EGÉSZSÉGÜGYI RENDSZERTERVEZÉS · OPERATÍV ANALITIKA · 2026

Nem a triázs a szűk *keresztmetszet*

Sürgősségi osztályok túlterhelési protokolljainak elemzése sorbanállási modellekkel — tudományos alapokon nyugvó vezetői kézikönyv

Melegh János Gábor

Adatforrás: Gouveia et al., Applied Sciences 2021, 11(2), 805

2026

Nem a triázs a szűk keresztmetszet

Sürgősségi osztályok túlterhelési protokolljainak elemzése sorbanállási modellekkel

Szerző: Melegh János Gábor

Első kiadás: 2026 · **Verzió:** 1.2

Adatforrás: Gouveia, C.; Kalakou, S.; Cardoso-Grilo, T. Modeling, Assessment and Design of an Emergency Department of a Public Hospital through Discrete-Event Simulation. *Applied Sciences* 2021, 11(2), 805. doi: 10.3390/app11020805

Módszertan: M/M/*c* Erlang-C sorbanállási modell · Monte Carlo érzékenységi vizsgálat (n = 10 000) · Siemens Tecnomatix Plant Simulation DES · Google Colab Python pipeline

Licenc: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Ez a könyv nem helyettesíti a klinikai döntéshozatalt, a helyi validációt vagy a részletes szimulációt. Célja, hogy a tudományos eredményeket döntési és közpolitikai nyelvre fordítsa.

TARTALOM

ELŐSZÓ

Miért készült ez a könyv? 9

I. RÉSZ — VEZETŐI KÉZIKÖNYV

1 Vezetői összefoglaló 13

2 A probléma: miért omlanak össze a sürgősségi osztályok? 21

3 A kulcsfogalmak egyszerűen 31

4 Az adatforrás és a modellezett sürgősségi rendszer 43

5 A betegút három fő állomása 53

6 A modell logikája: mit jelent az M/M/c? 63

7 A vizsgált túlterhelési forgatókönyvek 75

8 A fő eredmény: nem a triázs a szűk keresztmetszet 87

9 A protokollok összehasonlítása 99

10 Monte Carlo: mennyire robusztusak az eredmények? 113

11 Miért lehet kevesebb várakozás több beteg mellett? 125

12 Mit jelent mindez egy kórházvezetőnek? 135

13 Hogyan használható a modell a gyakorlatban? 147

14 Korlátok: mit nem szabad túlértelmezni? 159

15 Javasolt következő lépések 169

II. RÉSZ — TUDOMÁNYOS TANULMÁNY (ANGOL)

Surge Capacity Protocol Optimisation in Emergency Department Operations 179

FÜGGELÉK

A Adattáblák és eloszlásillesztési eredmények 215

B Konszolidált összehasonlítás — mind a 8 szcenárió 221

C Képletek és matematikai levezetések 227

Felhasznált szakirodalom 233

ELŐSZÓ

Miért készült ez a könyv?

A látható és a valódi torlódás közötti különbségről

A sürgősségi osztályok túlterhelése tipikusan nem ott válik veszélyessé, ahol először látszik. A váróteremben ülő betegek, a triázs előtt torlódó sor és a személyzetre nehezedő nyomás miatt a vezetői reflex gyakran az: „gyorsítsuk a triázst." Ez sokszor szükséges, de nem mindig elég. Sőt, bizonyos helyzetekben félrevezető.

A gyorsabb triázs ugyanis csak annyit jelent, hogy a beteg gyorsabban kerül be a rendszer következő szakaszába. Ha ott nincs elegendő kezelőorvos, vizsgálókapacitás vagy döntéshozó klinikai személyzet, a torlódás nem megszűnik — tovább vándorol. Elnyelődik a kezelési zónában, ahol már besorolt, potenciálisan életveszélyes állapotban lévő betegek várakoznak, nem egy váróteremben, hanem egy folyosói ágyon, láthatatlanul.

Ez a könyv annak a tanulmánynak a teljes, részletes feldolgozása, amely sürgősségi osztályi túlterhelési protokollokat vizsgált sorbanállási modellek segítségével. A tanulmány matematikailag precíz, a következtetései meglepőek, és azok számára, akik sürgősségi kapacitástervezéssel foglalkoznak, a módszertani alapoktól a napi döntéshozatalig érvényesek.

Kinek szól ez a könyv?

A könyv két olvasói rétegnek szól, és ezt a szerkezete is tükrözi.

Az **első rész** — a vezetői kézikönyv — azoknak íródott, akik kórházi, egészségügyi rendszerszintű vagy egészségpolitikai döntéshozatali pozícióban dolgoznak, és akiknek nincs szükségük a matematikai levezetések részleteire, de igénylik az eredmények mélyebb megértését annál, mint amit egy egyoldalas összefoglaló nyújtani képes. Ez a rész nem egyszerűsít le mindent — megőrzi a fogalmi precizitást, de kerüli a szükségtelen matematikai formalizációt.

A **második rész** a teljes tudományos tanulmány angol nyelven, minden módszertani részletével, táblázatával, képletével és hivatkozásával. Ez azoknak szól, akik a módszertan reprodukálhatóságát, a feltételezések érvényességét és az irodalmi kontextust is értékelni kívánják.

A **függelékek** az adatokat, képleteket és teljes irodalomjegyzéket tartalmazzák, amelyeket mindkét olvasói réteg hasznosíthat.

A tanulmány háttere

Az elemzett tanulmány egy manchesteri triázsrendszer szerint működő sürgősségi osztályt modellezett M/M/*c* Erlang-C sorbanállási modellel, hat különböző surge-protokoll hatékonyságát vizsgálva. A kiindulóadatok egy portugál közfinanszírozott kórház nyilvánosságra hozott aggregált adatain alapulnak.

A metodológiai döntés — analitikus sorbanállási modell alkalmazása diszkrét eseményvezetett szimuláció helyett — tudatosan választott kompromisszum volt. Az M/M/*c* modell gyors, átlátható, matematikailag zárt formában számítható, és lehetővé teszi a szisztematikus protokoll-összehasonlítást anélkül, hogy minden egyes forgatókönyvhöz hetek munkájú szimulációs modellt kellenene felépíteni. Ugyanakkor pontosan dokumentálja saját korlátait, és jelzi, hol szükséges a teljes DES-szimuláció.

Ami meglepő volt

A tanulmány három eredménye különösen figyelemre méltó.

Először: a Manchester triázs KPI — az a mutató, amelyet a sürgősségi osztályok teljesítményének mérésére leggyakrabban használnak — *minden vizsgált forgatókönyvben teljesült*, beleértve a százszázalékos túlterhelési esetet is, protokoll nélkül. Ez első hallásra megnyugtatónak tűnik. Valójában éppen az ellenkezőjét jelenti: a KPI megfelel, miközben a kezelési sorok összeomlanak.

Másodszor: az a protokoll, amely minimálisan elegendőnek bizonyult a teljes rendszerstabilitás helyreállításához (+100%-os surge esetén), hat extra orange-zónás orvost és két extra yellow-zónás orvost igényelt — miközben a triázsállomások számát önmagában bővítő protokoll egyáltalán nem stabilitált a kezelési oldal összeomlásán.

Harmadszor, és ez talán a legmeglepőbb: az optimális protokoll (P-D) surge-helyzetben *alacsonyabb* orange kezelési várakozást eredményez, mint az alaprendszer normál üzemben. Nem azért, mert a betegek száma csökkent, hanem mert a kapacitásméretezés törvényei a jól méretezett párhuzamos rendszerekben hatékonysági előnyt termelnek. Ezt az összefüggést Erlang-féle négyzetgyök-staffing hatásnak nevezzük.

> *„A sürgősségi osztály surge-kapacitását nem a triázspultok száma, hanem az orange és yellow kezelési zónák stabil orvosi kapacitása dönti el."*
>
> — A könyv legfontosabb gyakorlati mondata

Hogyan olvasható ez a könyv?

A könyv lineárisan olvasható, de modulárisan is. A fejezetek egymásra épülnek, de minden fejezet elején összefoglalom a lényeget, így az az olvasó is követni tudja a gondolatmenetet, aki csak bizonyos részeket kíván elolvasni.

Ha az olvasónak csak a döntési következtetések fontosak: az 1., a 8., a 9. és a 12. fejezet elegendő. Ha a módszertan érdekli: a 3., a 6. és a II. rész ajánlott. Ha a számokat szeretné: a függelék tartalmaz minden adattáblát és képletet.

ELSŐ FEJEZET

I Vezetői összefoglaló

A legfontosabb üzenetek egyetlen fejezetben

Ez a fejezet önállóan olvasható. Tartalmazza a teljes könyv legfontosabb következtetéseit, a kulcsszámokat és a döntési szempontokat. A többi fejezet e következtetések részletes megalapozása.

1.1 A legfontosabb üzenet

A vizsgált modell szerint egy sürgősségi osztály +100%-os betegforgalmi terhelés mellett is képes lehet teljesíteni a triázsra vonatkozó 10 perces KPI-t, miközben a kezelési sorai már összeomlanak. Ez nem elméleti lehetőség — a számítások szerint pontosan ez a helyzet minden olyan protokollnál, amely csak a triázs kapacitását vagy az ágyszámot bővíti, de nem emeli érdemben a kezelési zónák orvosi kapacitását.

KRITIKUS ÜZENET

A triázs-KPI önmagában nem mutatja meg, hogy a sürgősségi osztály valóban működőképes-e. Lehet, hogy a beteg gyorsan megkapja az első besorolást, de utána órákon át vár az érdemi orvosi ellátásra. Ezt a várakozást a KPI nem méri, és a jelenlegi mutatórendszer nem teszi láthatóvá.

1.2 Mi volt a vizsgálat tárgya?

A tanulmány egy Manchester Triage System szerint működő sürgősségi osztályt modellezett. A rendszer három fő betegfeldolgozási szakaszt tartalmazott: adminisztratív felvétel (átlag 8 perc), triázs (átlag 5 perc) és zónaspecifikus kezelés (zöld: 45 perc, sárga: 90 perc, narancs: 150 perc).

A betegérkezést és a feldolgozási időket publikált portugál sürgősségi osztályi adatok alapján paraméterezték. A kiinduló betegérkezési ráta 4,2 beteg/óra volt (napi ~100,8 beteg). A surge +100% forgatókönyvben ez 8,4 beteg/órára nőtt, miközben a narancs betegek aránya a betegmixben 14%-ról 30%-ra emelkedett — mert válsághelyzetekben arányosan több súlyos eset érkezik.

Hat surge-protokollt vizsgált a tanulmány (P-A-tól P-D+-ig), és valamennyi eredményét összehasonlította az alapeseti (S0) és a protokoll nélküli surge-esettel (S2).

1.3 A legfontosabb eredmények

EREDMÉNY 1 — TRIÁZS

A Manchester triázs KPI **minden vizsgált forgatókönyvben teljesült**, beleértve a surge +100% protokoll nélküli esetet is (98,65%). A triázs-sor kihasználtsága még a legrosszabb esetben is $\rho = 0{,}350$, azaz messze a stabilitási határ alatt.

EREDMÉNY 2 — KEZELÉSI SOROK

A kezelési sorok **már surge +50%-tól instabillá válnak** az alap személyzeti konfigurációval. Surge +100%-on az orange kezelési sor kihasználtsága $\rho = 3{,}150$ — háromszoros a stabilitási határhoz képest. A P-A (triázsbővítés), P-B (ágybővítés) és P-C (kombinált) protokollok egyike sem állítja helyre a stabilitást.

EREDMÉNY 3 — MINIMUM STABIL PROTOKOLL

A **P-D protokoll** (4 triázsállomás, 8 orange-zónás orvos, 4 yellow-zónás orvos) az első és minimálisan szükséges konfiguráció, amely egyszerre teljesíti a triázs KPI-t *és* stabilizálja mindkét kezelési sort ($\rho_{orange} = 0{,}788$; $\rho_{yellow} = 0{,}819$).

EREDMÉNY 4 — ROBUSZTUS PROTOKOLL

A **P-D+ protokoll** (9 orange-zónás orvos, 5 yellow-zónás orvos, +1–1 fő a P-D-hez képest) 10 000 Monte Carlo szimulációból minden esetben stabil maradt ±20%-os paraméterbizonytalanság mellett. Ez az ajánlott operatív standard.

1.4 A meglepő effektus

A P-D protokoll — bár kétszeres betegforgalmat kezel — alacsonyabb átlagos orange kezelési várakozást produkál (38,0 perc), mint az alaprendszer normál üzemben (176,2 perc). Ez az Erlang-féle négyzetgyök-staffing hatás következménye: a jól méretezett, párhuzamosan dolgozó szerverek a véletlen ingadozásokat jobban elnyelik, ezért az egységnyi betegre jutó várakozási idő csökken. A 11. fejezet ezt részletesen tárgyalja.

1.5 Mit jelent ez vezetői nyelven?

Ha egy sürgősségi osztály túlterhelődik, nem elég azt kérdezni: „Hány beteg vár triázsra?" A fontosabb kérdés:

A KÉT DÖNTŐ KÉRDÉS

1. **Hány beteg vár tényleges kezelési döntésre és ellátásra az orange és yellow zónában?**

2. **Hány párhuzamos kezelőkapacitás áll rendelkezésre ezekben a zónákban most, ebben a műszakban?**

Ha a második szám nem elég nagy az első szám kiszolgálásához, a rendszer matematikailag instabil — függetlenül attól, hogy a triázs-KPI zöldben van.

MÁSODIK FEJEZET

2 A probléma: miért omlanak össze a sürgősségi osztályok?

A látható és a valódi torlódás természetéről

A sürgősségi osztály túlterhelése nem pusztán azt jelenti, hogy sok beteg érkezik. A valódi összeomlás akkor kezdődik, amikor az érkezési ütem tartósan meghaladja azt az ütemet, amellyel a rendszer képes a betegeket feldolgozni, kezelni, elbocsátani vagy továbbadni.

2.1 A sürgősségi túlterhelés nem egyszerűen sok beteg

A közigazgatási és klinikai dokumentációban a „túlterhelés" fogalmát rendszerint akkor használjuk, amikor a váróterem tele van, a triázs előtt hosszú sor áll, és a napi betegszám meghaladja a tervezett kapacitást. Ez a megközelítés érthető, mert a váróterem látható, a sor mérhető, és a napi betegszám könnyen dokumentálható.

A probléma azzal kezdődik, hogy a látható torlódás és a veszélyes torlódás nem mindig esik egybe. Egy rendszer összeomlhat úgy is, hogy a váróterem viszonylag üres, ha a folyamat más pontján — a kezelési zónákban — a kapacitás eléri a határát. Fordítva: egy zsúfolt váróterem önmagában nem jelent rendszerösszeomlást, ha a kezelési oldal képes a betegeket megfelelő ütemben felvenni.

2.2 A látható és a valódi torlódás különbsége

A triázs előtti várakozás könnyen látható: mérhető fizikailag, dokumentálható a KPI-rendszerben, és vizuálisan is nyilvánvaló a személyzet számára. A kezelési zónában kialakuló torlódás ezzel szemben kevésbé látványos, de klinikai szempontból veszélyesebb.

Az orange és yellow zónákban várakozó betegek már elvégzett triázson vannak túl: az egészségügyi rendszer tudja, hogy súlyos az állapotuk, és regisztrálta őket. De ha nincs elegendő kezelőorvos, ezek a betegek egy folyosói ágyon vagy egy vizsgálóban várakoznak — besorolva, de ellátás nélkül. Ez az ún. *boarding* jelenség, amelyet a nemzetközi irodalom egybehangzóan a sürgősségi mortalitásnövekedés egyik legfontosabb tényezőjeként azonosít.

> KLINIKAI KONTEXTUS
>
> Richardson (2006) kimutatta, hogy az ED túlterhelés 10 napos mortalitással korrelál. Hoot és Aronsky (2008) szisztematikus áttekintése 41 tanulmány alapján dokumentálta, hogy a kezelési várakozás meghosszabbodása összefügg a tünetek rosszabbodásával, a gyógyszerezési hibákkal és a páciens-elégedettség csökkentésével. Ezek az összefüggések a triázs-KPI teljesítése esetén is fennállnak, ha a kezelési sor instabillá vált.

2.3 A surge-helyzet sajátossága

Surge-helyzetnek nevezzük azt az időszakot, amikor a betegérkezési ráta jelentősen meghaladja a normál tervezési kapacitást. A leggyakoribb surge-okok:

- Influenzajárvány vagy légúti betegség-hullám (évente visszatérő)
- Pandémiás krízis (COVID-19 a legfrissebb példa)
- Tömeges baleset, természeti katasztrófa

- Hőségriadó — az idősebb és krónikus betegek számának hirtelen emelkedése
- Regionális kapacitáskiesés — szomszédos kórház átmeneti bezárása, sztrájk, infrastrukturális esemény
- Nagy rendezvény közelségéből adódó betegforgalmi emelkedés

A surge-helyzet sajátossága, hogy nemcsak a betegszám nő, hanem a betegmix is megváltozik. Járvány esetén az orange és yellow kategóriás betegek aránya aránytalanul nő, mert a súlyosabb esetek hamarabb az ED-hez kerülnek, miközben a zöld kategóriás betegek egy része otthon marad vagy alternatív ellátóhelyet keres.

A tanulmányban vizsgált surge +100% szcenárióban a betegérkezési ráta 4,2/óráról 8,4/órára nőtt, az orange betegek aránya 14%-ról 30%-ra emelkedett. Ez azt jelenti, hogy az orange zónát érő terhelés nemcsak megduplázódott, de — a betegmix-változás miatt — meg is háromszorozódott: az orange terhelés 4,2 × 0,14 = 0,588 beteg/óráról 8,4 × 0,30 = 2,52 beteg/órára nőtt, ami 4,3-szoros növekedés.

> MATEMATIKAI PONTOSÍTÁS
>
> Az orange zónát érő terhelés surge +100% esetén nem megduplázódik, hanem **4,3-szorosára nő**, a betegmix-változás miatt. Ez magyarázza, hogy miért nem elegendő a betegforgalom arányos kapacitásbővítése: a legkritikusabb zóna terhelése az átlagnál jóval jobban nő.

2.4 Az összeomlás mechanizmusa

A sorbanállási elméletben egy rendszer instabilnak minősül, ha a kiszolgálási kapacitás kisebb, mint az érkezési terhelés. Ez a rho (ρ) mutatóban fejezhető ki:

$$\rho = \lambda / (c \cdot \mu)$$

ahol λ az érkezési ráta, c a párhuzamos kapacitásegységek száma, μ az egységnyi kapacitás kiszolgálási sebessége. Ha $\rho \geq 1$, a sor matematikailag instabil: a várakozók száma nem stacionárius folyamat, hanem elvileg korlátlanul nő.

Az összeomlás nem azonnali és nem látványos. Néhány perccel a stabilitási határ meghaladása után a sor elkezdhet növekedni. Egy-két óra múlva a sor már annyira hosszú, hogy a kezelési várakozás klinikai szempontból kritikussá válik. Három-négy óra után az egész ED-folyamat lelassulhat, mert a kezelési zónákból nem tudnak elbocsátani betegeket, így az upstream folyamatok (triázs, felvétel) is megakadnak.

Ezt a dinamikát — amelyet a szimulációs irodalom *cascade failure*-nek vagy kaszkád-összeomlásnak nevez — az M/M/*c* modell ugyan nem tudja teljesen megragadni (ez a DES feladata), de pontosan jelzi, hogy *mikor* lép be a rendszer az instabilitási tartományba, és *mennyivel* kellene növelni a kapacitást a stabilitás helyreállításához.

2.5 Miért nem látják ezt a vezetők?

Az egészségügyi menedzsment hagyományosan a triázs-KPI-t és a napi betegszámot követi, mert ezek könnyen mérhetők, dokumentálhatók és összehasonlíthatók. A kezelési zóna kihasználtsági mutatója (ρ) nem része a standard egészségügyi teljesítménymérési keretrendszernek, és a klinikai információs rendszerek általában nem számítják ki valós időben.

Ráadásul a triázs-KPI teljesítése — amelyet a hatósági felügyelet és az akkreditációs rendszerek elsődleges mérőszámként kezelnek — látszólagos biztonságérzetet teremt. Ha a KPI zöldben van, a vezető joggal feltételezi, hogy a rendszer rendben van. A tanulmány egyik legfontosabb üzenete éppen az, hogy ez a feltételezés hibás lehet.

A RENDSZERKOCKÁZAT

A triázs-KPI teljesítése és a kezelési sor instabilitása **egyszerre fennállhat**. Ez nem kivételes eset — a tanulmányban ez volt az általános helyzet minden olyan protokollban, amely nem a kezelési kapacitást bővítette elsősorban. A kockázat rendszerszintű és mérhető.

HARMADIK FEJEZET

3 A kulcsfogalmak egyszerűen

Szótár és fogalmi alap a nem matematikus olvasónak

Ez a fejezet azoknak szól, akik nem sorbanállási elméleti háttérrel olvassák ezt a könyvet. A fogalmak precíz megértése szükséges ahhoz, hogy a számokat, táblázatokat és következtetéseket helyesen értelmezzük.

3.1 Manchester triázs és KPI

A Manchester Triage System (MTS) az egyik legelfogadottabb sürgősségi prioritási rendszer Európában. Az Egyesült Királyságban, Portugáliában, Hollandiában és más európai országokban kötelező vagy ajánlott standard. Az MTS szerint a sürgősségi osztályra érkező minden beteget az egészségügyi személyzet öt kategória valamelyikébe sorolja:

Szín	Kategória neve	Max. várakozás	KPI-cél	Klinikai jelentés
Piros	Azonnali	0 perc	100%	Életveszélyes, azonnali beavatkozás
Narancs	Sürgős	**10 perc**	**≥ 95%**	Súlyos, de nem azonnali életveszély
Sárga	Mielőbb	30 perc	≥ 90%	Nem sürgős, de kezelést igényel
Zöld	Ráér	120 perc	≥ 85%	Nem sürgős, ambuláns szinten is ellátható
Kék	Nem sürgős	240 perc	—	Minimális sürgősség

1. táblázat. *Manchester Triage System — prioritáskategóriák és KPI-ok. A tanulmány elsősorban a narancs kategóriával foglalkozik, mert ez a legérzékenyebb indikátor surge-helyzetben.*

A KPI — Key Performance Indicator, azaz kulcsteljesítménymutató — ebben a kontextusban azt jelenti, hogy az adott kategóriájú betegek legalább a meghatározott százalékban kapjanak első orvosi vagy nővéri kontaktust a maximális várakozási időn belül. **Fontos:** ez a kontaktus a triázs végeztével elért első szakmai érintkezés — nem teljes orvosi kezelés, hanem az ellátási folyamat megkezdése.

3.2 Szerver és kapacitásegység

A sorbanállási modellekben a „szerver" (kiszolgáló) általános kifejezés bármely kapacitásegységre, amely betegeket tud egyszerre ellátni. Ez lehet:

- Egy triázsállomás (ahol egy nővér egyszerre egy beteget sorolhat be)
- Egy orvos vagy kezelőpáros az orange zónában
- Egy vizsgálóhelyiség kezelőágy-kapacitásokkal

A „szerver" fogalma tehát nem azonos a fizikai ágyszámmal. Egy ágyon feküdhet beteg, akihez nincs orvosi döntési kapacitás — ez nem szerveri kapacitás, hanem tároló. A valódi kapacitás az egyidejűleg kezelési döntést

hozó, beteget ellátó szakemberi egységek száma.

3.3 Kihasználtság: a rho (ρ) mutató

A rho a rendszer-kihasználtsági együttható, az operatív kockázat legfontosabb összefoglaló mutatója:

$$\rho = \lambda / (c \cdot \mu)$$

ahol λ = érkezési ráta, c = párhuzamos szerverek száma, μ = kiszolgálási sebesség

Rho értéke	Rendszerállapot	Várakozási idő viselkedése	Vezetői értelmezés
0,50	Komfortos	Minimális várakozás	A kapacitás kb. fele felhasznált
0,70	Normál üzem	Mérsékelt várakozás	Hatékony, de nem feszes
0,85–0,95	Feszes	Érzékenyebbé válik	Minden ingadozás azonnal érezhető
≥ 1,00	**Instabil**	**Elvileg korlátlanul nő**	**Összeomlási kockázat**

2. táblázat. *A rho értéke és rendszerszintű következményei. Rho ≥ 1 esetén a várólista stacionárius állapota nem létezik — a sor folyamatosan nő.*

A rho értéke vezeti le az összes többi mérőszámot: a várható várakozási időt, az összeomlás valószínűségét és a szükséges kapacitásbővítés mértékét. Ezért ez a könyv minden szcenárióban a rho értékkel együtt értelmezi az összes többi mutatót.

3.4 Sorbanállási stabilitás és instabilitás

Egy sor stabil, ha hosszú időtávon a várakozók átlagos száma véges marad — azaz a rendszer képes az összes beérkező beteget ésszerű idő alatt kiszolgálni. Instabil sor esetén a várakozók száma elvileg korlátlanul nő, és a sor soha nem ürül ki teljesen.

A valóságban az instabilitás nem jelent azonnali, végtelen várólistát: a betegek elmennnek, elvesznek a sorból, más intézménybe kerülnek, vagy a személyzet ad hoc megoldásokkal kompenzál. Mégis, az instabil rendszer kiszámíthatatlanul viselkedik, és az átlagos várakozási idő rendkívül érzékeny minden kisebb paraméterbizonytalanságra.

3.5 Monte Carlo érzékenységi vizsgálat

A matematikai modellek névleges paraméterekkel dolgoznak: átlagos érkezési ráta, átlagos kezelési idő. A valóságban ezek a paraméterek ingadoznak: van amikor több beteg érkezik, van amikor kevesebb; van amikor a kezelés hosszabb, van amikor rövidebb.

A Monte Carlo módszer ezt a bizonytalanságot modellezi: 10 000-szer lefuttatjuk a számítást, minden alkalommal véletlenszerűen módosítva a paramétereket ±20%-os határon belül. Az eredmény nem egyetlen szám, hanem egy eloszlás: megmutatja, hogy a legjobb esetben, a legrosszabb esetben és az esetek 90%-ában mi várható.

> MIÉRT FONTOS EZ?
>
> Egy protokoll, amely névleges paraméterekkel stabilnak látszik, de a paraméterek ±20%-os szórása esetén az esetek 30%-ában instabillá válik, nem tekinthető megbízható surge-protokollnak. A Monte Carlo vizsgálat pontosan ezt a különbséget teszi láthatóvá a P-D és a P-D+ protokoll között.

3.6 Erlang-C modell

Az Erlang-C képlet a legszélesebb körben alkalmazott analitikus eszköz a többszerver sorbanállási rendszerek modellezéséhez. A neve Carl Erlang (1878–1929) dán matematikusra utal, aki a telefonhálózatok kapacitástervezéséhez fejlesztette ki az alapmodellt az 1900-as évek elején.

Az Erlang-C modell pontosan megadja a várakozási valószínűséget (milyen arányban kell a betegnek egyáltalán várnia) és a várható várakozási időt stabil rendszerben. Az általa adott számítások zárt formájúak és szemléletes — ez teszi különösen alkalmassá gyors protokoll-összehasonlításra.

Korlátai: feltételezi a Poisson-érkezést, az exponenciális szervizidőt és a stacionárius állapotot. A valóságban a sürgősségi osztályok napszak szerint is változnak, és a kezelési idők lognormálisak (nem exponenciálisak). Ezek a korlátok a modellt a tárgyalt összefüggések tekintetében azonban nem érvénytelenítik — a II. rész és a Függelék részletezi ezt.

NEGYEDIK FEJEZET

4 Az adatforrás és a modellezett sürgősségi rendszer

Honnan jöttek az adatok, és milyen rendszert modelleztünk?

A tanulmány nem új betegadatokat gyűjtött — nyílt hozzáférésű, aggregált, publikált adatokat elemzett újra. Ez módszertanilag célszerű döntés volt: elkerüli az etikai engedélyezési akadályokat, és lehetővé teszi a teljes reprodukálhatóságot.

4.1 Az adatforrás

Az összes paraméter Gouveia, Kalakou és Cardoso-Grilo 2021-es tanulmányából (Gouveia et al., 2021) származik, amelyet az *Applied Sciences* folyóirat közölt nyílt hozzáféréssel. A tanulmány egy észak-portugál, közfinanszírozott kórház sürgősségi osztályát vizsgálta diszkrét eseményvezetett szimulációval, 12 hónap tényadatai alapján. A betegek felnőtt, ambuláns kóresetek voltak.

A portugál közfinanszírozott egészségügyi rendszer strukturálisan hasonlít a legtöbb európai köz-kórházi rendszerhez: magas betegforgalom, korlátozott erőforrás, kötelező Manchester triázs alkalmazás, és hasonló betegmix-jellemzők. Az adatok tehát nem tekinthetők specifikusan portugálnak — megfelelő helyi validálással más európai sürgősségi osztályokra is alkalmazhatók.

4.2 A betegérkezési adatok

Mutató	Érték	Megjegyzés
Baseline érkezési ráta	4,2 beteg/óra	Poisson-folyamat — véletlenszerű, memória nélküli érkezés
Napi megfelelője	~100,8 beteg/nap	24 órás lefedettség
Surge +50%	6,3 beteg/óra	Influenza-szezon, regionális kapacitáskiesés
Surge +100%	8,4 beteg/óra	Pandémia, tömegbaleset, extrém hullám
Átlagos érkezési köz (alap)	14,3 perc	Exponenciális köz-eloszlás

3. táblázat. *Betegérkezési paraméterek. A Poisson-érkezési feltételezés (véletlen, memória nélküli) standard az ED-irodalomban, és a portugál adatokra statisztikailag tesztelt.*

4.3 A betegmix és annak surge alatti változása

A betegmix — az egyes triázsszínek aránya a teljes betegforgalomban — nem marad állandó surge-helyzetben. Egy járvány esetén az enyhébb eseteket otthoni kezelés vagy háziorvosi ellátás szűri ki, míg a súlyosabbak az ED-be kerülnek. Emiatt a narancs kategória aránya aránytalanul nő:

Triázskategória	Alap (%)	Surge +50% (%)	Surge +100% (%)	Változás
Zöld	55%	49%	42%	**−13 pp**
Sárga	30%	30%	26%	**−4 pp**
Narancs	14%	20%	30%	**+16 pp**
Piros	1%	1%	2%	**+1 pp**

4. táblázat. *Betegmix szcenáriónként. A narancs kategória aránya surge +100%-on több mint megduplázódik, ami a kezelési terhelés aránytalanul nagy növekedését okozza.*

4.4 A kiindulókapacitás

Az alap (S0) rendszerkonfiguráció, amelyet a tanulmány referenciapontként használ:

Erőforrástípus	Alap darabszám	Rho (alap)	Klinikai megjegyzés
Triázsállomások	2 db	0,175	Jól méretezett, bőséges tartalék
Narancs-zónás orvosok	2 fő	0,735	Magas, de stabil — közepes kockázat
Sárga-zónás orvosok	2 fő	0,945	**Kritikusan magas** — minimális tartalék
Narancs-zóna ágyak	20 ágy	—	Pufferkapacitás
Sárga-zóna ágyak	15 ágy	—	Pufferkapacitás
Zöld-zóna ágyak	22 ágy	—	Pufferkapacitás

5. táblázat. *Alap rendszerkonfiguráció és kihasználtság. A sárga-zóna orvosi kihasználtsága már alapállapotban is 0,945 — ez azt jelenti, hogy bármilyen terhelésnövekedés azonnal instabilitásba taszítja ezt a zónát.*

> FIGYELEMRE MÉLTÓ ADAT
>
> A sárga-zóna alap kihasználtsága $\rho = 0{,}945$ — ami azt jelenti, hogy az alap (nem-surge) rendszer is rendkívül közel van az instabilitási határhoz. Ez a szám előre jelzi, hogy minden surge-szcenárióban a sárga-zóna lesz az egyik első pont, ahol az összeomlás megjelenik. A tanulmány ezt pontosan igazolja: surge +50%-on a sárga-zóna ρ értéke azonnal 1,418-ra ugrik.

4.5 Az eloszlásillesztés minősége

A feldolgozási időket log-normális eloszlással illesztettük. A Kolmogorov–Smirnov teszt minden folyamatszakaszra elvégzett — az eredmények szerint minden illesztés statisztikailag elfogadható (p-értékek 0,05 felett):

Folyamatszakasz	Átlag (perc)	Szórás (perc)	KS p-érték	Illeszkedés
Adminisztratív felvétel	8,0	3,0	0,9197	**Kiváló**
Triázs	5,0	2,0	0,0605	**Elfogadható**
Zöld kezelés	45,0	20,0	0,8900	**Kiváló**
Sárga kezelés	90,0	35,0	0,3157	**Jó**
Narancs kezelés	150,0	60,0	0,6527	**Jó**

6. táblázat. *Eloszlásillesztési eredmények (Kolmogorov–Smirnov teszt, n = 1000 szintetikus minta). Minden p-érték > 0,05, ami a log-normális illesztés statisztikai elfogadhatóságát igazolja.*

ÖTÖDIK FEJEZET

5 A betegút három fő állomása

Felvételtől a kezelésig — ahol az idő elvész, és ahol visszaszerezhető

A sürgősségi osztályra érkező beteg útja három egymás utáni feldolgozási állomáson halad át. Mindhárom állomás sorbanállási rendszer: minden állomásnak van kiszolgálási kapacitása, van érkezési terhelése, és ha a terhelés meghaladja a kapacitást, sor képződik.

5.1 Első állomás: adminisztratív felvétel

Minden beteg az adminisztratív felvételen keresztül lép be a rendszerbe, ahol az adataikat rögzítik, azonosítókat kapnak, és az IT-rendszerbe kerülnek. Az átlagos felvételi idő 8 perc, szórással együtt lognormális eloszlást követ.

A felvételi állomás kapacitása ritkán szűk keresztmetszet surge-helyzetben, mert a felvételis munka részben párhuzamosítható, és általában a triázs előtt vagy közben elvégezhető. A modellben a felvételi állomás kihasználtsága surge +100% esetén is jóval 1 alatt marad.

5.2 Második állomás: triázs

A triázsállomáson egy képzett nővér vagy orvos elvégzi a beteg sürgősségi szortírozását, és meghatározza a triázsszínt. Az átlagos triázsidő 5 perc, triangulár eloszlással (3–9 perc tartomány). Ez a legrövidebb feldolgozási idő a három állomás közül.

A triázs-állomás kihasználtsági mutatója az alap konfigurációban rendkívül alacsony ($\rho = 0{,}175$), ami azt jelenti, hogy a triázskapacitás nagyobb, mint amennyi az alapterhelés kezeléséhez szükséges. Ez magyarázza, hogy miért teljesül a triázs-KPI még surge +100% esetén is: a triázsrendszer egyszerűen bőven elegendő kapacitással rendelkezik.

A modell szerint surge +100% esetén a triázs-kihasználtság $\rho = 0{,}350$-re nő (2 triázsállomással), ami messze a stabilitási határ alatt van. 4 triázsállomással $\rho = 0{,}175$-re csökken vissza — ez magyarázza, hogy a P-A protokoll (triázsbővítés) 100%-os KPI-megfelelést biztosít. De a kezelési oldalon semmit sem javít.

5.3 Harmadik állomás: kezelés a triázsszín szerinti zónában

A triázs után a beteg a triázsszínjének megfelelő kezelési zónába kerül. Ez az állomás *más nagyságrendű* feldolgozási idővel dolgozik, mint az első kettő:

Zóna	Átlagos kezelési idő	Szórás	Eloszlás	Betegmix (surge +100%)
Zöld	45 perc	20 perc	Log-normális	42%
Sárga	90 perc	35 perc	Log-normális	26%
Narancs	**150 perc**	**60 perc**	**Log-normális**	**30%**

7. táblázat. *Zónaspecifikus kezelési idők. A narancs zóna kezelési ideje (150 perc) 30-szorosra az átlagos triázsidőnek (5 perc). Ez az arány magyarázza a kapacitási aszimmetriát.*

A kezelési időnek ez a nagyságrendbeli különbsége a triázstól az operatív kockázat egyik alapvető forrása. Egy triázsállomás 5 percenként szabadul fel — egy narancs kezelőhely csak 150 percenként. Így ahol 1 triázsnövér elegendő egy 5 beteg/órás forgalom kezeléséhez, ott (matematikailag) legalább 8 narancs orvos szükséges 2,52 narancs beteg/óra fogadásához.

5.4 A kapacitási aszimmetria

A három állomás közötti kapacitási aszimmetria az ED-működés strukturális jellemzője, és egyben a legfontosabb ok, amiért a triázs-KPI félrevezető lehet:

> A KAPACITÁSI ASZIMMETRIA
>
> Egy triázsállomás 5 perc alatt felszabadul. Egy narancs-zónás orvos 150 perc alatt szabadul fel. Ez 30-szoros különbség. Következménye: a triázsrendszer bőséges kapacitástartalékkal tud surge-helyzeteket elnyelni, miközben a kezelési oldal ugyanennyi terhelésnövekedéstől összeomlik.
>
> Ez nem tervezési hiba — ez az ellátás természetéből következik. A kezelés komplexebb, hosszabb és személyzetintenzívebb, mint a triázs. Ennek tudatában kell megtervezni a surge-protokollokat.

5.5 A teljes tartózkodási idő (LOS)

A beteg teljes kórházi tartózkodási ideje (Length of Stay, LOS) az összes állomás feldolgozási idejének és várakozási idejének összege:

$$LOS = \text{várakozás (triázs)} + \text{triázs} + \text{várakozás (kezelés)} + \text{kezelés} + \text{adminisztratív kilépés}$$

A tanulmány szerint surge +100% esetén, P-D protokollal:

- Narancs LOS: ~201 perc (kezelési várakozás ~38 perc, kezelés ~150 perc)

- Sárga LOS: ~182 perc (kezelési várakozás ~79 perc, kezelés ~90 perc)
- P-D+ protokollal a narancs LOS ~177 percre csökken (kezelési várakozás ~14 perc)

Összehasonlításképpen, az alap rendszer normál üzemnél a narancs LOS ~339 perc — mert a kezelési várakozás ~176 perc a magas rho érték (0,735) miatt.

> PARADOXON
>
> Az alap rendszer normál üzemnél (~100 beteg/nap) hosszabb narancs LOS-t produkál (~339 perc), mint a P-D protokoll surge +100% esetén (~201 perc). A magyarázat az Erlang négyzetgyök-staffing hatás, amelyet a 11. fejezet részletesen tárgyal.

HATODIK FEJEZET

6 A modell logikája: mit jelent az M/M/c?

Miért kell modell, hogyan működik, és hol a határa

Az M/M/c Erlang-C modell a többszerver sorbanállási rendszerek analitikus eszköze. Gyors, zárt formájú, és matematikailag egzakt a feltételezéseinek érvényességi körén belül. Ez a fejezet elmagyarázza a logikáját anélkül, hogy a levezetésébe merülne.

6.1 Miért kell egyáltalán modell?

A sürgősségi osztály működését nem lehet pusztán átlagokkal megérteni. Két azonos napi betegszámú osztály nagyon eltérően működhet attól függően, hogy mikor érkeznek a betegek, milyen arányban súlyosak, mennyi ideig tart a kezelésük, és hány párhuzamos kapacitásegység áll rendelkezésre.

Ha 100 beteg érkezik naponta, és az átlagos kezelési idő 2 óra, ez elsőre elegendőnek tűnhet 8 óráig nyitva tartó 4 vizsgálóval (4 × 8 / 2 = 16 kezelés/műszak → 48/nap három műszakban). De ha a betegek nem egyenletesen érkeznek — reggel sokan, éjjel kevesen —, és ha a kezelési idők nem pontosan 2 óra hanem van köztük 30 perces és 4 órás is, az átlagszámítás teljesen félrevezet.

A sorbanállási modell ezt a véletlen ingadozást veszi figyelembe, és megmondja, mi várható nemcsak átlagban, hanem a legrosszabb esetekben is.

6.2 Az M/M/c modell három betűje

A jelölés három tulajdonságot kódol:

- **Első M (Markov — érkezés):** A betegérkezések Poisson-folyamatot követnek. Ez azt jelenti, hogy az egymást követő érkezések közötti időközök egymástól függetlenek és exponenciálisan eloszlottak. Intuitíven: az, hogy mikor érkezett az előző beteg, semmit nem mond arról, mikor érkezik a következő. Ez a véletlenszerűség modellez minden olyan érkezési folyamatot, ahol nincs merev menetrend.
- **Második M (Markov — kiszolgálás):** A kezelési idők exponenciális eloszlásúak. Ez egy technikai feltételezés, amelyet a valóságban a lognormális eloszlás közelít jobban (az ED-irodalom konszenzusa szerint). A modell ezért enyhe alulbecslést produkálhat a várakozási időre — a II. rész és a Függelék ezt részletezi.
- ***c* (szerverek száma):** A rendszerben *c* db párhuzamos kiszolgáló dolgozik, amelyek egyenértékűek és egymással felcserélhetők. Surge-protokoll esetén *c* az a szám, amelyet a protokoll meghatároz.

6.3 Az Erlang-C képlet lényege

A modell két legfontosabb kimenetele:

1. Erlang-C valószínűség — C(*c*, *a*): annak valószínűsége, hogy egy érkező betegnek egyáltalán várnia kell (az összes szerver foglalt). Ez a „várakozási csúcskockázat".

2. Várható várakozási idő — W_q: az átlagos idő, amelyet a beteg a sor végén tölt, mielőtt kiszolgálásra kerülne.

$$C(c,a) = \frac{(a^c/c!) \cdot \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{-1}}{\left[\sum_{k=0}^{c-1} a^k/k! + (a^c/c!) \cdot \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{-1}\right]}$$

$$W_q = C(c, a) / [c \cdot \mu \cdot (1 - \rho)]$$

ahol $a = \lambda/\mu$ az ajánlott terhelés Erlangban, $\rho = \lambda/(c\mu)$ a kihasználtság. A KPI-megfelelési valószínűség:

$$P(W_q \leq t_{max}) = 1 - C(c, a) \cdot \exp[-(c\mu - \lambda) \cdot t_{max}]$$

Ezek a képletek zárt formájúak — nincs szükség szimulációra, a számítás másodpercek alatt elvégezhető Python, Excel vagy akár fejben (közelítőleg).

6.4 A modell korlátai — amit nem szabad figyelmen kívül hagyni

ELOSZLÁS-FELTÉTELEZÉS

Az M/M/c modell exponenciális kiszolgálási időt feltételez, de a valódi kezelési idők lognormálisak (jobbra elnyúló, hosszú farokkal). A Pollaczek–Khinchine képlet alapján a lognormális eloszlás magasabb variációs koefficiense (CV) növeli a várható várakozási időt az exponenciálishoz képest. Az orange kezelési idő CV ≈ 0,40 értékével a korrekciós faktor körülbelül 1,08 — azaz az M/M/c kb. 8%-kal alulbecsüli a várakozást. Ez mérsékelt torzítás, amely a következtetéseket nem érvényteleníti, de a pontos tervezéshez DES szükséges.

STACIONARITÁS FELTÉTELEZÉSE

Az M/M/c modell feltételezi, hogy a betegérkezési ráta időben állandó. A valóságban az ED-k napi csúcsokat és mélypontokat mutatnak — általában délelőtt és kora este a legmagasabb a forgalom. A napszaki ingadozás kezeléséhez időfüggő (nem-stacionárius) modell vagy DES szükséges.

HOMOGÉN SZERVEREK

A modell feltételezi, hogy az összes orvos azonos sebességgel dolgozik, és felcserélhető. A valóságban orvosi teljesítmény szórása, specialitásbeli különbségek és fáradtsághatások is jelen vannak. Ezek hatása bizonytalan irányú — egyes esetekben javítják, másokban rontják a teljesítményt az átlaghoz képest.

> MÓDSZERTANI DÖNTÉS
>
> Az M/M/*c* modell nem tökéletes kórházi szimuláció — hanem **gyors, átlátható döntési előszűrő**. Lehetővé teszi, hogy a nyilvánvalóan elégtelen protokollokat rövid idő alatt kizárjuk, és a részletes DES-szimulációt a valóban ígéretes megoldásokra koncentráljuk. A tanulmányban ez pontosan így működött: a P-A, P-B, P-C protokollok analitikusan bizonyultak elégtelenek, és csak a P-D és P-D+ irányába folyt a mélyebb vizsgálat.

6.5 Az Erlang-C a triázs-sorra alkalmazva

Fontos módszertani pontosítás: a Manchester triázs KPI a *triázs előtti* várakozási időre vonatkozik, nem a kezelési várakozásra. Ezért az Erlang-C modellnek a *teljes* betegérkezési rátát (λ_{total}) és a *triázsállomások számát* ($c_{\text{triázs}}$) kell használnia a KPI számításához — nem az egyes zónák töredékterhelését.

Az eredeti notebook (v1.0) éppen ebben hibázott: a kezelési időt (150 perc) alkalmazta szervizrátának a triázs helyett (5 perc), ami 30-szoros torzítást okozott és minden eredményt érvénytelenített. A v1.1 korrekció ezt javította. A könyv kizárólag a v1.1 és v1.2 pipeline-on alapuló, helyes eredményeket tartalmaz.

HETEDIK FEJEZET

7 A vizsgált túlterhelési forgatókönyvek

Nyolc szcenárió, hat protokoll, egy döntési mátrix

A tanulmány nyolc forgatókönyvet vizsgált: két referenciaesetet és hat surge-protokollt. Ez a fejezet bemutatja mindegyiket, és megmagyarázza, hogy mit kísérelt meg megoldani az egyes protokollok.

7.1 A vizsgálati logika

A vizsgálat logikája a következő kérdéssorból építkezett: Mi a helyzet normál üzemnél? Mi történik surge esetén, ha nem teszünk semmit? Segít-e, ha csak a triázst bővítjük? Segít-e, ha csak az ágyszámot növeljük? Segít-e a kettő kombinációja? Ha egyik sem elég, mire van szükség valójában?

Ez a kérdéssor nem véletlenszerű — leképezi a valódi döntéshozatali logikát, amellyel egy kórházvezető szembesül surge-előkészítéskor. A válaszok azonban meglepőek.

7.2 Az összes szcenárió áttekintése

Szcenárió	λ/h	Narancs arány	Triázs áll.	Narancs orv.	Sárga orv.	Narancs ágy	Sá ág
S0 — Alap	4,2	14%	2	2	2	20	1
S1 — Surge +50%	6,3	20%	2	2	2	20	1
S2 — Surge +100%, protokoll nélkül	8,4	30%	2	2	2	20	1
S2 + P-A — Triázsbővítés	8,4	30%	4	2	2	20	1
S2 + P-B — Ágy- és staffing bővítés	8,4	30%	2	4	3	26	2
S2 + P-C — Kombinált (P-A + P-B)	8,4	30%	4	4	3	26	2
S2 + P-D — Emelt kezelési kap. ★	**8,4**	**30%**	**4**	**8**	**4**	**26**	**2**
S2 + P-D+ — Megerősített ★★	**8,4**	**30%**	**4**	**9**	**5**	**26**	**2**

8. táblázat. *A vizsgált szcenáriók teljes paramétermátrixa. A vastagon szedett értékek az alap konfigurációhoz képest módosított paramétereket jelölik. A ★ jelzésű protokollok érik el a teljes rendszerstabilitást.*

7.3 Az egyes protokollok logikája és hipotézise

S0 — ALAP (REFERENCIA)

Ez a referenciaállapot: a portugál kórház tényleges konfigurációja. Minden összehasonlítás ehhez viszonyul. Bár stabil, a sárga kezelési sor kihasználtsága már alapállapotban is 0,945 — ezért bármilyen terhelésnövekedés azonnal kritikus lehet.

S1 — SURGE +50%

Egy influenzahullám vagy regionális kapacitáskiesés tipikus terhelése. Nincs protokoll-aktiválás, az alap konfiguráció próbál megbirkózni a megnövekedett forgalommal. A triázs rendben van — de mi a helyzet a kezelési oldalon?

S2 — SURGE +100%, PROTOKOLL NÉLKÜL

A „worst case" referenciaeset. A betegszám megduplázódik, a betegmix súlyosabb lesz, de a kórház semmit nem tesz. Ez a legfontosabb referenciapont, mert megmutatja, hogy a jelenlegi rendszer mennyire sebezhető.

P-A — TRIÁZSBŐVÍTÉS (2→4 TRIÁZSÁLLOMÁS)

Hipotézis: Ha a triázs az első szűk keresztmetszet, a bővítése megoldja a problémát.

Valóság: A triázs kihasználtsága még P-A nélkül is csak 0,350 surge +100%-on — nem szűk keresztmetszet. A P-A javítja a KPI-t (100%-ra emeli), de a kezelési oldalon semmit sem változtat.

P-B — ÁGYBŐVÍTÉS ÉS MÉRSÉKELT KEZELÉSI STAFFING

Hipotézis: Ha több ágy és néhány extra orvos van, a rendszer kezelni tudja a surge-ot.

Valóság: A P-B 4 orange orvost és 3 sárga orvost állít be (alapból 2-2). Ez csökkenti a kihasználtságot (orange: 1,575-ről 1,575-re — mert az ágybővítés nem orvosi kapacitás!), de $\rho > 1$ marad, a rendszer instabil.

FONTOS FÉLREÉRTÉS

Az ágy önmagában **nem kezel betegséget**. Ha az ágyszámot bővítjük, de nem növeljük az orvosi döntési kapacitást, az ágybővítés csak tárolókapacitást ad — a betegek hosszabb ideig várakoznak, de az ellátási sebesség nem nő. A P-B ezt a hibát illusztrája: az ágybővítés és a mérsékelt staffingbővítés együtt sem elegendő a stabilitáshoz.

P-C — KOMBINÁLT (P-A + P-B)

Hipotézis: Ha a triázsbővítés és az ágybővítés együtt nem elég, a kettő kombinációja talán igen.

Valóság: A P-C 100%-os triázs KPI-t, 4 orange orvost és 3 sárga orvost kombinál. De az orange kihasználtság $\rho = 1{,}575$ — a P-B-vel azonos, mert a triázsbővítés nem orvosi kapacitást ad. A kezelési oldalon P-B = P-C.

P-D — EMELT KEZELÉSI KAPACITÁS (8 ORANGE + 4 SÁRGA ORVOS)

Hipotézis: Az egyetlen módja a teljes stabilitás helyreállításának a kezelési kapacitás érdemi növelése.

Valóság: A P-D az első protokoll, amely egyszerre teljesíti a triázs KPI-t ÉS stabilizálja mindkét kezelési sort. Orange kihasználtság: $\rho = 0{,}788$. Sárga kihasználtság: $\rho = 0{,}819$. Mindkettő 1 alatt.

P-D+ — MEGERŐSÍTETT KEZELÉSI KAPACITÁS (9 ORANGE + 5 SÁRGA ORVOS)

Hipotézis: A P-D marginalisan stabil (P95 $\rho > 1$). Két extra orvossal a robusztusság lényegesen javítható.

Valóság: A P-D+ P95 ρ értékei 0,902 (orange) és 0,843 (sárga) — mindkettő stabilan 1 alatt. P(mindkét sor stabil) = 100% a Monte Carlo vizsgálatban. Ez az ajánlott standard.

„Nem a triázsbővítés, nem az ágybővítés, és nem a kettő kombinációja — hanem az orvosi kezelési kapacitás érdemi növelése az egyetlen módja a teljes rendszerstabilitás hely-reállításának surge-helyzetben."

— A tanulmány operatív következtetése

NYOLCADIK FEJEZET

8 A fő eredmény: nem a triázs a szűk keresztmetszet

Amit a számok pontosan megmutatnak

Ez a fejezet a könyv legfontosabb számait tartalmazza. A triázs KPI és a kezelési sorkihasználtság egymás mellé helyezve mutatja meg, hogy mi a valódi kapacitáskorlát.

8.1 A triázs KPI minden forgatókönyvben teljesül

Az első meglepő eredmény: a Manchester triázs KPI — $P(W_{\text{triázs}} \leq 10$ perc) $\geq 95\%$ az orange kategóriára — egyetlen vizsgált szcenárióban sem sérül. Még surge +100% esetén, protokoll nélkül is 98,65%-os megfelelést mutat. Ez nem azt jelenti, hogy a triázs nem fontos — azt jelenti, hogy a triázsrendszer a vizsgált betegterhelési szinteken jól méretezett volt.

Szenárió	Triázs KPI (%)	ρ triázs	KPI-cél (95%)	Teljesül?
S0 Alap	99,81	**0,175**	≥ 95%	✓ Igen
S1 Surge +50%	99,43	**0,263**	≥ 95%	✓ Igen
S2 Surge +100%, nincs protokoll	98,65	**0,350**	≥ 95%	✓ Igen
S2 + P-A	100,00	**0,175**	≥ 95%	✓ Igen
S2 + P-B	98,65	**0,350**	≥ 95%	✓ Igen
S2 + P-C	100,00	**0,175**	≥ 95%	✓ Igen
S2 + P-D	**100,00**	**0,175**	≥ 95%	✓ Igen
S2 + P-D+	**100,00**	**0,175**	≥ 95%	✓ Igen

9. táblázat. *Triázs KPI megfelelés valamennyi szcenárióban. A triázs KPI minden esetben teljesül — a triázs-sor nem a szűk keresztmetszet.*

8.2 A kezelési sorok ezzel szemben instabillá válnak

A második, és döntő eredmény: miközben a triázs KPI minden szcenárióban zöldben van, a kezelési sorok súlyos instabilitásba kerülnek.

Szcenárió	ρ orange	ρ sárga	W_q orange (perc)	W_q sárga (perc)	Mindkét sor stabil?
S0 Alap	0,735	0,945	176,2	751,3	✓ Igen
S1 Surge +50%	1,575	1,418	∞	∞	✗ Nem
S2 Nincs protokoll	3,150	1,638	∞	∞	✗ Nem
S2 + P-A	3,150	1,638	∞	∞	✗ Nem
S2 + P-B	1,575	1,092	∞	∞	✗ Nem
S2 + P-C	1,575	1,092	∞	∞	✗ Nem
S2 + P-D ★	0,788	0,819	38,0	78,4	✓ Igen
S2 + P-D+ ★★	0,700	0,655	13,6	16,2	✓ Igen

10. táblázat. *Kezelési sor kihasználtság és várakozási idők. ρ ≥ 1 esetén a várólista matematikailag nem korlátos (∞). P-D az egyetlen protokoll, amely egyszerre teljesíti a triázs KPI-t és stabilizálja mindkét kezelési sort.*

8.3 A párhuzamos rendszerek azonos olvasata

Ahogy a táblázatból leolvasható: a P-A protokoll nem javít a kezelési oldalon egy szemernyit sem — az orange kihasználtság P-A esetén azonos az S2 protokoll nélküli esettel (ρ = 3,150). Ez azért van, mert a P-A csak triázsállomásokat ad, nem orange orvosokat. A triázskapacitás bővítése gyorsabban juttatja be a betegeket a kezelési zónákba — ahol ugyanannyi orvos vár rájuk, mint korábban.

A P-B és P-C ugyan csökkenti az orange kihasználtságot (4 orvossal ρ = 1,575-re), de ez még mindig 57,5%-kal meghaladja a stabilitási határt. A sor instabil marad — csak lassabban nő.

KRITIKUS TANULSÁG

Azok a protokollok, amelyek a triázs- vagy ágybővítésre koncentrálnak, **javíthatják a KPI-t, de nem szüntetik meg a kezelési sor összeomlását**. A KPI-javulás megtévesztő lehet: azt sugallja, hogy a protokoll működik, miközben a rendszer mélyebb rétegein az összeomlás zajlik.

8.4 A minimálisan szükséges orvosi kapacitás

A matematika egyértelmű: surge +100% esetén (λ = 8,4/óra, 30% orange arány) az orange zónát érő terhelés 8,4 × 0,30 / 60 = 0,042 beteg/perc, az orange kezelési ráta $\mu = 1/150 = 0{,}00667$ beteg/perc/orvos.

A stabilitás minimuma: $c \geq \lambda_{orange}/\mu = 0{,}042/0{,}00667 = 6{,}30 \rightarrow$ **legalább 7 orvos** szükséges pusztán a stabilitáshoz ($\rho < 1$). A P-D 8 orvost rendel be — ez éppen elegendő stabilitási tartalékot ad ($\rho = 0{,}788$). A P-D+ 9 orvossal $\rho = 0{,}700$-ra csökkenti a kihasználtságot.

A MINIMUMSZABÁLY

Az orange kezelési kapacitás minimuma surge-helyzetben: **min. orvosok = ceil(λ_{orange} / μ_{orange}) + 1**, ahol a +1 a stabilitási ráhagyás. Surge +100%-on ez 7 orvos. Biztonsági tartalékkal (P-D+): 9 orvos. Ez a szám a helyi adatokból közvetlenül kiszámítható.

KILENCEDIK FEJEZET

9 A protokollok összehasonlítása

Mi a különbség a P-D és P-D+ között — és miért számít a két extra orvos?

Ez a fejezet a három döntési releváns forgatókönyvet — S0 alap, S2+P-D és S2+P-D+ — részletesen összehasonlítja az összes operatív mutató mentén.

9.1 A három fő forgatókönyv egy táblázatban

Mutató	S0 — Alap	S2 + P-D	S2 + P-D+	P-D vs P-D+
Érkezési ráta	4,2/h	**8,4/h (+100%)**	**8,4/h (+100%)**	—
Narancs betegmix	14%	**30%**	**30%**	—
Triázsállomások	2	4	4	—
Narancs orvosok	2	**8**	**9**	+1 fő
Sárga orvosok	2	**4**	**5**	+1 fő
Triázs KPI	**99,81%**	**100,00%**	**100,00%**	—
ρ orange (steady-state)	**0,735**	**0,788**	**0,700**	−0,088
ρ orange P95 (Monte Carlo)	**0,947**	**1,015**	**0,902**	−0,113
ρ sárga (steady-state)	**0,945**	**0,819**	**0,655**	−0,164
ρ sárga P95 (Monte Carlo)	**1,216**	**1,054**	**0,843**	−0,211
P(mindkét sor stabil, MC)	**64,9%**	**85,0%**	**100,0%**	**+15 pp**
W_q orange (Erlang-C)	**176,2 p**	**38,0 p**	**13,6 p**	**−24,4 p**
W_q sárga (Erlang-C)	**751,3 p**	**78,4 p**	**16,2 p**	**−62,2 p**
Extra orvos (alaptól)	0	+6 narancs, +2 sárga	**+7 narancs, +3 sárga**	+2 összesen

11. táblázat. *A három fő szcenárió teljes összehasonlítása. P95: Monte Carlo 95. percentilis értéke ±20% paramétervariáció mellett (n = 10 000).*

9.2 Miért csak 2 extra orvos számít ennyit?

A P-D és P-D+ különbsége mindössze 2 extra orvos (+1 orange, +1 sárga). Mégis a P(mindkét sor stabil) mutatóban 15 százalékpontos javulást okoz (85%→100%), a sárga kezelési várakozásban 62 perces csökkentést (78→16 perc), és az orange P95 rho értéket 1,015-ről 0,902-re viszi — a stabilitási határ alá.

Ez az Erlang-C modell nemlinearitásának következménye. Magas kihasználtság ($\rho \approx 0{,}8–0{,}9$) közelében a W_q és az Erlang-C valószínűség rendkívül érzékeny a kapacitásváltozásra: egy extra szerver drasztikusan csökkenti a várakozási időt, mert a $(1-\rho)$ nevező az összefüggésben is megváltozik.

> A NEMLINEARITÁS LÉNYEGE
>
> Ha $\rho = 0{,}80$: $W_q \propto 1/(1-0{,}80) = 5$
>
> Ha $\rho = 0{,}70$: $W_q \propto 1/(1-0{,}70) = 3{,}33$
>
> Ez 33%-os várakozáscsökkentés mindössze 0,1 rho-csökkenéssel. A magas kihasználtsági tartományban az extra kapacitás haszna ugrásszerű. Ez magyarázza, hogy miért számít a két extra orvos, és miért érdemes a P-D+ mellé dönteni, ha a lehetőség adott.

9.3 Az alap rendszer rejtett gyengesége

A 11. táblázat egy másik fontos tényt is megmutat: az alap rendszer (S0) sárga kezelési várakozása 751 perc. Ez azt jelenti, hogy normál üzemnél a sárga betegek átlagosan közel 12,5 órát várnak a kezelőorvosra, miután a triázson átmentek. Ez a szám a magas alap-kihasználtságból ($\rho = 0{,}945$) következik.

Ez nem a modell hibája — ez a valóság. A sárga-zóna alap-konfigurációja már normál üzemnél is a stabilitási határ közelében van, és a kezelési várakozás a magas ρ miatt rendkívül hosszú. Ezt a tényt a KPI-rendszer nem

mutatja, mert a KPI csak a triázs-várakozást méri.

> AZ ALAP RENDSZER REJTETT PROBLÉMÁJA
>
> Normál üzemnél a sárga kezelési várakozás ~751 perc. Ez az adat **nem szerepel egyetlen standard KPI-dashboardon sem** — mert a KPI a triázs-várakozást méri, és a triázs rendben van ($\rho = 0{,}175$). A kezelési sor összeomlik, a KPI zöld. Ez az information gap a legfontosabb rendszerkockázat, amelyet ez a tanulmány megmutat.

9.4 A stabilitás és a komfort közötti különbség

A P-D protokoll stabil — de a sárga kezelési várakozás még P-D esetén is 78 perc. Ez magas érték, bár véges (az instabilis esetekhez képest, ahol a várakozás elvileg korlátlan). A P-D+ ezt 16 percre csökkenti — ami nemcsak klinikai szempontból jobb, hanem a rendszer rugalmasságát is növeli.

Ezért a tanulmány két ajánlást tesz: P-D a *minimálisan elegendő* surge-protokoll, P-D+ a *robusztus üzemi standard*. A döntés elsősorban az elérhető orvosi kapacitáson és a spike-kockázat megítélésén múlik.

TIZEDIK FEJEZET

10 Monte Carlo: mennyire robusztusak az eredmények?

Amikor a valóság eltér a névleges értéktől — 10 000-szeres tesztelés

Az analitikus modell névleges paraméterekkel dolgozik. De a valóságban a betegérkezés lehet gyorsabb, a kezelési idők hosszabbak, a triázs lassabb. A Monte Carlo vizsgálat arra kérdez rá: mi történik, ha egyszerre minden rossz irányba tolódik?

10.1 A módszer lényege

A Monte Carlo érzékenységi vizsgálat 10 000 véletlenszerű paraméter-kombinációt próbál ki. Minden egyes futtatásban a következő négy paraméter egyenletesen, véletlenszerűen változik a névleges érték ±20%-a körül:

- Betegérkezési ráta (λ): ±20%
- Triázs feldolgozási idő ($\mu_{\text{triázs}}^{-1}$): ±20%
- Narancs kezelési idő (μ_{orange}^{-1}): ±20%
- Sárga kezelési idő ($\mu_{\text{sárga}}^{-1}$): ±20%

A ±20%-os sáv a valóságban előforduló paraméterbizonytalanság konzervatív becslése: a betegérkezés napi szinten tipikusan ±10–15%-ot ingadozik, az orvosi kezelési idő ennél jobban szór. A ±20% tehát egy reális, de nem

extrém forgatókönyvet fed le.

10.2 Az eredmények — három forgatókönyvre

Mutató	S0 Alap	S2 + P-D	S2 + P-D+
P(triázs KPI ≥ 95%)	1,0000	1,0000	1,0000
KPI P_{10} percentilis	0,9953	1,0000	1,0000
KPI P_{50} medián	0,9981	1,0000	1,0000
ρ orange medián	0,726	0,778	0,691
ρ orange P_{95}	0,947	1,015 (!)	0,902
ρ sárga medián	0,933	0,809	0,647
ρ sárga P_{95}	1,216	1,054 (!)	0,843
P(mindkét sor stabil)	64,9%	85,0%	100,0%

12. táblázat. *Monte Carlo robusztussági eredmények (n = 10 000, ±20% egyenletes paramétervariáció). P_{10}, P_{50}, P_{95}: empirikus percentilisek a 10 000 futtatás eloszlásából. A sárga háttérrel jelölt értékek marginálisan instabilitást jeleznek a szélső esetekben.*

10.3 A triázs KPI tökéletesen robusztus

A triázs KPI minden szcenárióban és a Monte Carlo összes futtatásában teljesül: P(KPI ≥ 95%) = 1,000 mindhárom vizsgált konfigurációban. A P_{10} értéke P-D és P-D+ esetén is 1,000 — azaz még a legrosszabb 10%-os paraméterkombinációban sem sérül a KPI. Ez megerősíti, hogy a triázsrendszer robusztusan méretezett.

10.4 A P-D marginális farokrizikója

A P-D protokoll az analitikus (névleges) modellben stabil (ρ = 0,788). A Monte Carlo vizsgálat azonban megmutatja, hogy a P95 rho értéke 1,015 — tehát a szélső 5%-ban (a legrosszabb paraméterkombinációknál) az

orange kezelési sor marginálisan instabillá válik. Ez azt jelenti, hogy 10 000 szimulált napból kb. 500-ban az orange sor instabil — ha minden paraméter egyszerre a legrosszabb irányba tolódik.

Ezt *farokrizikónak* (tail risk) nevezzük. A klinikai kockázatkezelés szempontjából releváns kérdés: a szélső 5% mennyire valószínű a valóságban, és milyen következményekkel jár?

> A P-D FAROKRIZIKÓJÁNAK ÉRTELMEZÉSE
>
> A P-D P95 ρ = 1,015 az orange zónában. Ez azt jelenti, hogy egy 8,4 beteg/órás forgalmú napon, ahol *egyszerre* a betegmix is a legrosszabb, a kezelési idők is a leghosszabbak, és az érkezések is a legsűrűbbek — a rendszer marginálisan instabillá válik. Ilyen napok ritkák, de egy valódi surge-helyzetben nem kizárhatók. A P-D+ ezt a kockázatot teljesen megszünteti.

10.5 A P-D+ teljesen robusztus

A P-D+ protokoll P95 rho értékei 0,902 (orange) és 0,843 (sárga) — mindkettő stabilan 1 alatt, a Monte Carlo összes 10 000 futtatásában. P(mindkét sor stabil) = 1,000 = 100%. Ez teljes robusztusságot jelent a ±20%-os paramétervariáció teljes spektrumán.

10.6 Az alap rendszer rejtett instabilitása

A táblázat egy harmadik fontos eredményt is megmutat: az alap rendszer (S0) Monte Carlo robusztussága *normál üzemnél* is csak 64,9%. Ez azt jelenti, hogy a névlegesen stabil alap rendszer az esetek 35%-ában instabillá válik, ha a paraméterek ±20%-ot ingadoznak. A sárga P95 ρ = 1,216 az alap rendszernél — ez komoly instabilitási kockázat.

Ez nem elméleti szőrszálhasogatás. Ez azt jelenti, hogy az alap rendszer rendszeres napi ingadozás során is időről időre instabilitásba kerül — és ezt a KPI nem mutatja.

10.7 Összefoglaló: a robusztussági döntési mátrix

Protokoll	KPI robusztus?	Kezelési sor stabil (medián)?	Farokrizikó (P95)?	Ajánlás
S0 Alap	**Igen**	**Részben**	**Magas (S: 1,216)**	Csak normál üzemnél
P-A, P-B, P-C	**Igen**	**Nem**	**Rendszer instabil**	**Nem ajánlott surge-ra**
P-D	**Igen**	**Igen**	**Mérsékelt (O: 1,015)**	**Minimum stabil surge**
P-D+	**Igen**	**Igen**	**Nincs (< 1,0)**	**Ajánlott standard**

13. táblázat. *Robusztussági döntési mátrix. A P-D+ az egyetlen protokoll, amely a ±20%-os paramétervariáció teljes spektrumán biztonságosan működik.*

> *„Ha csak az átlagos állapot érdekel, a P-D elegendő. Ha a valóság bizonytalanságára is fel akarunk készülni, a P-D+ a jobb döntés."*
>
> — A Monte Carlo elemzés összefoglalása

TIZENEGYEDIK FEJEZET

11 Miért lehet kevesebb várakozás több beteg mellett?

Az Erlang négyzetgyök-staffing hatás és amit a mérlegszámítások nem mutatnak meg

A tanulmány egyik legmeglepőbb eredménye: a P-D protokoll surge +100% esetén rövidebb átlagos narancs kezelési várakozást produkál, mint az alap rendszer normál üzemnél — annak ellenére, hogy kétszer annyi beteg érkezik. Ez nem mértani sor, nem hiba és nem kivétel. Ez törvény.

11.1 A paradoxon

Normál üzemnél, 4,2 beteg/óra érkezéssel és 2 orange orvossal az átlagos orange kezelési várakozás 176,2 perc. P-D protokollal, 8,4 beteg/óra érkezéssel (kétszeres terhelés!) és 8 orange orvossal az átlagos orange kezelési várakozás 38,0 perc — azaz 77,4%-kal alacsonyabb. Ez valóban paradoxnak tűnik.

Két változott: a betegszám megduplázódott, és az orvosszám megnégyszereződött. Intuitívan azt várnánk, hogy ha az orvosszám nő arányosan vagy annál jobban, a várakozás csökkenhet. De nem 77%-os csökkenést várnánk — és nem azt várnánk, hogy ez a várakozás jóval a normál üzem várakozása alá kerül.

11.2 A magyarázat: az Erlang-féle négyzetgyök-staffing törvény

A jelenség mögött az úgynevezett Erlang négyzetgyök-staffing törvény áll (Halfin–Whitt, 1981), amelyet a távközlési és egészségügyi kapacitástervezés egyik legfontosabb alapösszefüggéseként tartanak számon.

A törvény lényege: nagy forgalmú, párhuzamos kiszolgálású rendszerekben az egy kiszolgálóra jutó várakozás csökken a rendszer méretével, ha a kapacitást megfelelően skálázzuk. Ez azért van, mert a véletlen ingadozások — a véletlenszerű érkezések és a változó kezelési idők — egy nagy kapacitású rendszerben jobban kiegyenlítődnek. Amíg az alap rendszerben 2 orvos közül az egyik sokat vár, amíg a másik 150 perces kezeléssel foglalkozik, addig 8 orvos esetén a terhelés kiegyenlítettebben oszlik el.

11.3 A matematikai mechanizmus

Az Erlang-C képletben a döntő tényező az Erlang-C valószínűség — C(c, a) —, amely azt mutatja, hogy egy érkező betegnek egyáltalán várnia kell-e (azaz: volt-e szabad orvos az érkezésekor):

Konfiguráció	Terhelés a (Erlang)	Orvosok c	ρ kihasználtság	C(c,a) várakozási valószínűség	W_q (perc)
S0 alap (2 orange orvos)	1,470	2	**0,735**	**62,3%**	**176,2**
P-D (8 orange orvos, surge+100%)	**6,300**	**8**	**0,788**	**11,4%**	**38,0**

14. táblázat. *Az Erlang-C mechanizmus az alap és P-D konfiguráció összehasonlításában. A terhelés ($a = \lambda/\mu$) megnégyszereződik, de a várakozási valószínűség C(c,a) 62,3%-ról 11,4%-ra csökken.*

Az alap rendszerben 62,3% az esélye, hogy egy érkező beteg foglalt orvosra talál és várnia kell. A P-D protokollban ugyanez az esély mindössze 11,4% — annak ellenére, hogy 4,3-szor annyi orange beteg érkezik. Miért?

Mert az ajánlott terhelés (a = 6,300 Erlang) és az orvosszám (c = 8) aránya kedvezőbb. A 8 párhuzamos orvos képes a 6,3 Erlang terhelést hatékonyan elosztani, a véletlen ingadozásokat elnyelni, és minimálisra csökkenteni az egyidejű foglaltság valószínűségét. Két orvos esetén bármilyen véletlen torlódás azonnal várakozást okoz — nyolc orvos esetén a torlódás valószínűsége töredéke az előzőnek.

> A TÖRVÉNY ÁLTALÁNOSÍTÁSA
>
> Az Erlang négyzetgyök-staffing törvény kimondja: ha a rendszer forgalma n-szorosára nő, és a szerver-számot $\sqrt{n}$-nél valamivel több szerverrel növeljük, a fajlagos (betegenkénti) várakozási idő csökkenni fog. Ez azt jelenti, hogy **egy jól méretezett nagy rendszer hatékonyabb, mint egy kis rendszer** — nemcsak abszolút, hanem relatív értelemben is.
>
> Következmény: a surge-helyzet nem szükségszerűen rosszabb az ügyeletes betegek számára, ha a kapacitásbővítés megfelelő. Ez ellentmond az intuitív elvárásnak, és pontosan az a típusú, nem-nyilvánvaló összefüggés, amelyhez modell kell.

11.4 Miért nem látják ezt a menedzserek?

Az egyszerű mérlegszámítás — „ha kétszer annyi beteg jön, kétszer annyi kapacitás kell" — nem veszi figyelembe a véletlen ingadozások hatását és az Erlang-törvényt. Ez a lineáris gondolkodás szinte kivétel nélkül túlbecsüli a szükséges kapacitást kis forgalom esetén, és alulbecsüli azt nagy forgalom esetén.

Egy másik tipikus tévedés: a „kapacitáskihasználtság-szemlélet". Ha az orvos 80%-ban foglalt, a vezető azt gondolhatja: „van 20% tartalék, bőven van helye a surge-nak." Valójában $\rho = 0{,}80$ esetén az Erlang-C valószínűség

és a várakozási idő nemlineárisan nő — és ρ = 0,95 esetén a várakozás már sokszorosa az ρ = 0,80 esetinek.

11.5 A tanulság a surge-tervezésben

Az Erlang négyzetgyök-effektus két fontos következménnyel bír a surge-protokollok tervezéséhez:

1. **Alul-lineáris kapacitásbővítés elegendő lehet:** Ha a forgalom megduplázódik, nem szükséges pontosan kétszer annyi orvos. A négyzetgyök-törvény alapján a stabilitáshoz elegendő lehet $\sqrt{2} \approx 1{,}41$-szeres kapacitásnövelés plusz egy biztonsági tartalék. (A konkrét szükséges szám az Erlang-képletből pontosan kiszámítható.)
2. **A hatékonyság surge-ban javulhat:** Paradox módon egy jól megtervezett surge-protokoll esetén az egy betegre jutó várakozási idő csökkenhet a normál üzemhez képest — ha a kapacitásbővítés kellően átgondolt. Ez nem véletlen — ez törvény.

> *„A nagyobb, jól méretezett párhuzamos kezelőkapacitás nemcsak több beteget lát el, hanem stabilabbá és kiszámíthatóbbá is teszi a rendszert."*
>
> — Az Erlang négyzetgyök-törvény következménye az ED-menedzsmentre

TIZENKETTEDIK FEJEZET

12 Mit jelent mindez egy kórházvezetőnek?

Döntési keretrendszer — mérőszámok, reakciók, téves reflexek

Ez a fejezet a tanulmány eredményeit operatív döntési keretrendszerré fordítja. Nem számítási útmutató — az elmúlt fejezetek elvégezték ezt a munkát. Ez a fejezet arra kérdez rá: mit kell máshogy csinálni holnaptól?

12.1 A triázs-KPI nem elégséges önmagában

A tanulmány legfontosabb menedzsment-következtetése egyértelmű: a triázs-KPI szükséges, de nem elegendő mutatója a sürgősségi osztály operatív egészségének. Egy osztály teljesítheti a KPI-t, miközben a kezelési sorai összeomlanak. Ez nem elméleti lehetőség — a tanulmány szerint az összes vizsgált, triázst előnybe részesítő protokollnál (P-A, P-B, P-C) pontosan ez a helyzet.

Az egészségügyi dashboardnak ezért legalább három különálló mutatót kellene tartalmaznia, amelyek egyenrangúak és egymás nélkül nem elegendők:

Mutató	Mit mér?	Figyelmeztetési küszöb	Összeomláskockázat
Triázs várakozás (KPI)	Triázs-sor kihasználtság	KPI < 95%	Triázs túlterheltség
Orange kezelési ρ	Kezelési sor stabilitása	ρ > 0,85	Kezelési összeomlás
Yellow kezelési ρ	Kezelési sor stabilitása	ρ > 0,85	Kezelési összeomlás

15. táblázat. *A javasolt hárommutatós monitoring keretrendszer. A kiemelten szedett sorok azok, amelyek a jelenlegi KPI-rendszerből hiányoznak.*

12.2 A valós idejű döntési tábla

A következő döntési tábla mutatja, hogy különböző jelekre milyen vezetői reakció javasolt:

Figyelt jel	Értelmezés	Javasolt azonnali reakció	Protokoll
Triázs KPI romlik (<95%)	Front-end torlódás	Triázsállomás és adminisztratív kapacitás vizsgálata	P-A aktiválás
Orange ρ közelít 0,85-höz	Narancs kezelési zóna telítődik	Orange orvoskapacitás aktiválása — mielőtt ρ eléri az 1,0-t	P-D előkészítés
Yellow ρ közelít 0,85-höz	Középsúlyos betegáramlás lassul	Yellow kapacitás aktiválása	P-D előkészítés
Triázs jó, kezelés rossz	**Rejtett rendszerösszeomlás**	**Treatment surge aktiválás — nem puszta triázsbővítés!**	**P-D / P-D+**
Mindkét kezelési ρ > 1	Instabil működés	Válságprotokoll: divert, extra staffing, DES	P-D+ + válság

16. táblázat. *Valós idejű döntési tábla. A negyedik sor (vastag) a legveszélyesebb helyzet, mert a KPI zöld, és a veszélyt a hagyományos dashboardok nem jelzik.*

12.3 Az ágy és az orvos nem ugyanaz

Az egészségügyi kapacitástervezésben a „kapacitás" fogalmát sokszor az ágyak számával azonosítják. Ez a könyv több helyen megmutatja, hogy ez félrevezető lehet.

Az ágy önmagában három dolog lehet:

- **Fizikai férőhely:** a beteg le tud feküdni
- **Megfigyelőhely:** a beteg monitorozható
- **Valódi kezelési kapacitás:** ott van az orvos, aki döntést hoz és beavatkozik

A sorbanállási modell — és a valóság — szempontjából csak a harmadik számít. Az első kettő puffert és komfortot ad, de nem csökkenti a várakozási sort, ha nincs mögötte orvosi döntési kapacitás. A P-B protokoll pontosan ezt illusztrálja: ágybővítés plusz mérsékelt staffingbővítés — és a rendszer instabil marad, mert az orvosszám nem elegendő.

12.4 A protokoll-aktiválás időzítése

A tanulmány alapján a protokoll-aktiválás *megelőző jellegű* kell legyen — nem reaktív. Az összeomlás nem azonnali: néhány perccel a $\rho = 1$ átlépése után a sor elkezd nőni, egy-két óra múlva látható problémává válik, három-négy óra múlva visszafordíthatatlan helyzetet teremt a műszakon belül.

Ezért a javasolt aktiválási küszöb $\rho = \mathbf{0{,}85}$, nem $\rho = 1{,}0$. A 0,85-ös küszöb elegendő időt hagy a protokoll bevezetéséhez és az extra orvosok berendeléséhez, mielőtt a sor valóban összeomlana.

A PROTOKOLL-AKTIVÁLÁS ARANYSZABÁLYA

A surge-protokoll aktiválása **megelőző** kell legyen. Ha $\rho = 0{,}85$-nél aktiváljuk a P-D protokollt, van időnk a rendszerbe állítani a kapacitást, mielőtt az összeomlás megkezdődik. Ha $\rho = 1{,}0$-nál aktiváljuk, már késő — a sor elindult növekedni, és az extra kapacitás visszaállítása is időbe telik.

12.5 Minimum és biztonságos protokoll — a döntési keret

A tanulmány két protokollt ajánl, amelyek különböző kockázattolerancia-szintnek felelnek meg:

Protokoll	Konfiguráció	Stabilitás (névleges)	Stabilitás (±20%, MC)	Orange W_q	Ajánlás
P-D	4 triázs / 8 orange / 4 sárga orv.	**Igen ($\rho = 0{,}788$)**	**85,0%**	**38 perc**	Minimum viable surge
P-D+	**4 triázs / 9 orange / 5 sárga orv.**	**Igen ($\rho = 0{,}700$)**	**100,0%**	**14 perc**	**Ajánlott operatív standard**

17. táblázat. *A két ajánlott protokoll összehasonlítása. A P-D+ választása egyetlen extra orvos kérdése mindkét zónában — és 15 százalékpontos robusztusságnyereséget hoz.*

TIZENHARMADIK FEJEZET

13 Hogyan használható a modell a gyakorlatban?

Audit, kalkulátor, korai figyelmeztető, és az út a DES felé

A tanulmány analitikus keretrendszerét nem csak tudományos következtetések levonására lehet alkalmazni. Ez a fejezet bemutatja, hogyan válik belőle működő döntéstámogató eszköz egy kórházi operatív tervezési cikluson belül.

13.1 Első alkalmazás: meglévő surge-tervek auditja

Szinte minden kórház rendelkezik valamilyen surge-tervvel. Ezek általában ágyszám-bővítést, triázsgyorsítást és személyzeti átcsoportosítást írnak elő. Az Erlang-C keretrendszer segítségével ezek a tervek gyorsan auditálhatók: kiszámítható, hogy az előírt konfigurációval a kezelési sor ρ értéke stabil-e surge esetén.

Az audit lépései egyszerűek:

1. Gyűjtsd össze a surge-esetbeli várható érkezési rátát és betegmixet
2. Azonosítsd a surge-terv által előírt orvosi kapacitást zónánként
3. Számítsd ki a ρ értéket minden zónára: $\rho = \lambda_{\text{zóna}} / (c_{\text{orv}} \times \mu_{\text{zóna}})$
4. Ha $\rho \geq 1$ bármely zónában: a surge-terv elégtelen a kezelési oldalon

Ez az audit elvégezhető egy egyszerű Excel-táblával vagy egy Python-notebookban (a tanulmány Colab pipeline-ja erre közvetlenül alkalmazható).

13.2 A protokoll-aktiválási küszöb kiszámítása

A tanulmány logisztikus regressziós modellel meghatározta a protokoll-aktiválási küszöböt az alap rendszerre: $\lambda = 13{,}3$ beteg/óra esetén eléri a 10%-os összeomlási valószínűséget. Ez 3,17× az alap érkezési rátának.

Helyi adatokkal ez a küszöb újraszámítható. A szükséges bemenetek: az alap érkezési ráta (λ_0), a triázsállomások száma (c_{tri}), az orange orvosok száma (c_o), az orange kezelési idő átlaga (μ_o^{-1}). A küszöb az a λ érték, amelynél $\rho = 0{,}85$ (a figyelmeztetési küszöb) vagy $\rho = 1{,}0$ (az összeomlási küszöb).

> HELYI KÜSZÖB-KALKULÁTOR
>
> Minden kórháznak célszerű kiszámítani a saját aktiválási küszöbét:
>
> $$\lambda_{\text{aktiválás}} = c_{\text{orange}} \times \mu_{\text{orange}} \times 0{,}85$$
>
> például: 2 orvos × (1/150 perc) × 0,85 = 0,01133 beteg/perc = 0,68 beteg/óra narancs zónában
>
> Ha az orange-arány 30%, ez 0,68/0,30 = 2,27 beteg/óra teljes rátának felel meg — azaz az aktiválás küszöbe jóval az alap 4,2/h alatt van. Ez azt jelenti, hogy az alap rendszer már normál üzemnél is közel a figyelmeztetési tartományban van.

13.3 Valós idejű monitoring kialakítása

A ρ értéket valós időben nem kell folyamatosan kiszámítani. Elég becsülni az aktuális orange kezelési sor hosszát (betegek száma, akik várakoznak kezelőorvosra az orange zónában) és az éppen aktív orange orvosok számát. Ha az egyidejűleg várakozók száma elkezd megközelíteni az aktív orvosok számát, az közelítőleg $\rho \approx 0{,}8$–$0{,}9$ jelzése.

Egy egyszerű valós idejű dashboard három mérőszámmal működhet:

- **Triázs-várakozók száma** — a KPI mutatója (front-end)
- **Orange zóna: várakozók száma / aktív orvosok száma** — ρ proxy (back-end)
- **Yellow zóna: várakozók száma / aktív orvosok száma** — ρ proxy (back-end)

13.4 A DES-szimuláció előszűréseként

A diszkrét esemény szimuláció (DES) a pontos tervezés eszköze, de időigényes — egy validált modell felépítése hetek munkája. Az Erlang-C analitika ezzel szemben percek alatt elvégezhető, és a nyilvánvalóan elégtelen protokollokat kiszűri.

A tanulmányban pontosan ez történt: a P-A, P-B, P-C protokollok analitikusan bizonyultak elégtelennek, és a P-D/P-D+ irányba koncentrálódott a mélyebb vizsgálat. A DES ezeket a protokollokat validálja és pontosítja — de nem kell velük az összes lehetséges konfigurációt szimulálni.

Ajánlott workflow:

1

Analitikus szűrés

Erlang-C modell az összes protokoll-variánsra. Azonosítsd, melyik stabilis és melyik nem. Ez elvégezhető Excel-ben vagy Pythonban.

2

Monte Carlo érzékenység

A stabil protokollokra futtass ±20%-os paramétervariációval 10 000 szimulációt. Azonosítsd a farokrizikókat. Ez a tanulmány Colab pipelinejával reprodukálható.

3

DES validálás

Az 1–2 legjobb protokollt validáld Plant Simulation vagy AnyLogic modellel, helyi adatokkal paraméterezhető konfigurációban. Ez adja meg a pontos LOS értékeket és napszaki dinamikát.

4

Protokoll kalibrálása

A DES eredmények alapján finomítsd a protokollt: mikor aktiválj, hány orvost rendelj be, mennyi az ügyeleti ráhagyás. Ez a kész operatív surge-terv alapja.

5

Pilot és visszacsatolás

Az első valódi surge-helyzet után rögzítsd az aktuális ρ értékeket és LOS-t, és hasonlítsd össze a modell-előrejelzéssel. Ez validálja a modellt, és lehetővé teszi a folyamatos javítást.

13.5 Helyi kalkulátor felépítése

A tanulmány alapján célszerű lenne minden kórházban — vagy legalább minden régióban — egy egyszerű Excel- vagy Python-kalkulátort üzemeltetni, amelybe a vezető (vagy a minőségbiztosítási osztály) beírhatja:

- A várható óránkénti betegérkezési rátát (aktuális vagy előre jelzett)
- A betegmixet (orange, yellow, green arányok)
- A rendelkezésre álló orvosok számát zónánként
- A helyi átlagos kezelési időket

A kalkulátor kimenetele: a várható ρ érték zónánként, a KPI-megfelelési valószínűség, és egy ajánlás: „Stabil", „Figyelmeztetési tartomány" ($\rho = 0{,}85$–$0{,}95$), vagy „Protokoll aktiválása szükséges" ($\rho \geq 0{,}95$).

TIZENNEGYEDIK FEJEZET

14 Korlátok: mit nem szabad túlértelmezni?

Minden modellnek vannak feltételezései — ezek ismerete a helyes alkalmazás alapja

Egy modell haszna arányos azzal, amennyire pontosan ismerjük a korlátait. Ez a fejezet nem a tanulmány hibáit sorolja — hanem azokat a feltételezéseket, amelyeket a helyi alkalmazás során figyelembe kell venni.

14.1 Egyetlen kórház adatai

A tanulmány paraméterei egyetlen észak-portugál közfinanszírozott kórház sürgősségi osztályából származnak. Ez a kórház méretében, betegmixében, orvosi struktúrájában és finanszírozási modelljében esetleg eltér az olvasó intézményétől.

Ez nem jelenti azt, hogy az eredmények nem érvényesek — a sorbanállási összefüggések (ρ stabilitása, Erlang-C törvény, négyzetgyök-effektus) matematikai törvények, nem kórházspecifikus empirikus megfigyelések. De a konkrét számok — mekkora a szükséges orvosszám, hol a protokoll-aktiválási küszöb — helyi adatokkal kell újraszámítani.

HELYI VALIDÁLÁS SZÜKSÉGES

A módszertant alkalmazzák a helyi adatokra — de **ne alkalmazzák közvetlenül a portugál számokat** más kórházakra. Az orange kezelési idő 150 perc, a betegmix 30% orange surge esetén, a baseline 4,2 beteg/óra — ezek mind kórházfüggő paraméterek. A tanulmány keretrendszere azonban minden hasonló rendszerre alkalmazható.

14.2 Az M/M/c modell leegyszerűsít

Az Erlang-C modell feltételezi:

- **Poisson-érkezést:** A betegek véletlenszerűen, egymástól függetlenül érkeznek. A valóságban van napszaki csúcs, heti minta és szezonális hatás — ezeket a stacionárius modell nem kezeli.
- **Exponenciális kezelési időt:** A valóságban a kezelési idők lognormálisak, ami némileg magasabb várakozást okoz az Erlang-C modellnél. A becsült eltérés ~8% az orange zónában.
- **Homogén szervereket:** Minden orvos egyforma sebességgel dolgozik. A valóságban tapasztalat, specialitás és fáradtság szerint szórás van.
- **Végtelen puffert:** A sor korlátlanul nőhet. A valóságban van fizikai korlátozás (ágyak száma), ami a modell érvényességét befolyásolhatja szélső esetekben.

14.3 A valós kezelési idők lognormálisak

Ez a legfontosabb technikai korlát. A log-normális eloszlás — amellyel a valóságos kezelési idők illeszkednek — magasabb variációs koefficiensű (CV), mint az exponenciális eloszlás. A Pollaczek–Khinchine (P–K) összefüggés alapján a lognormális eloszlással rendelkező M/G/1 rendszer várható várakozási ideje:

$$W_q(G) = W_q(M) \times (1 + CV^2) / 2$$

Az orange kezelési idő esetén (átlag 150 perc, szórás 60 perc, CV = 0,40): korrekciós faktor = (1 + 0,16)/2 = 0,58 — ez azt jelenti, hogy a valós várakozás az M/M/*c* becslésnél ~8%-kal magasabb lehet. Ez mérsékelt torzítás, amely a következtetéseket (P-D stabilis, P-A nem) nem változtatja meg, de a pontos LOS tervezéshez DES szükséges.

14.4 Napszaki ingadozás

Az egészségügyi irodalom jól dokumentálja a sürgősségi osztályok erős diurnális (napi) betegforgalmi mintázatát: általában délelőtt 10–11 óra és kora este 18–20 óra között a csúcs, éjjel 2–5 óra között a mélypontja. A csúcs–mélypont arány tipikusan 2–3-szoros.

Az M/M/*c* modell ezt nem kezeli — stacionárius, vagyis időfüggetlen rendszert feltételez. Egy valós kórházi surge-terv ezért a napszaki csúcsidőre kell kalibrálni, nem a napi átlagra. Ha a napi átlag $\lambda = 4{,}2/\text{h}$, a délelőtti csúcs $\lambda = 6–8/\text{h}$ is lehet normál üzemnél.

A napszaki ingadozás kezeléséhez time-varying Erlang modell (pl. SIPP-módszer) vagy DES-szimuláció szükséges.

14.5 Személyzeti fáradtság és műszakváltás

A modell homogén, fáradtságmentes szervereket feltételez. A valóságban a sebészeti és sürgősségi orvosi teljesítmény a műszak végén szignifikánsan romlik, ami megnöveli az effektív kezelési időt. Egy 12 órás surge-műszak második felében az orvosi teljesítmény akár 15–20%-kal is csökkenhet — ez μ csökkentést és ρ növekedést jelent.

A surge-protokolloknak ezért figyelembe kell venniük a műszakhosszat és a váltásokat: egy P-D protokoll, amely 12 óráig stabilnak tűnik, a 12. óra végén instabillá válhat a fáradtsághatás miatt.

14.6 Nincs cost-benefit elemzés

A tanulmány kizárólag kapacitási és stabilitási szempontból értékeli a protokollokat. A P-D+ ajánlás mögött nincs ekonomiai számítás: nem vettük figyelembe a plusz orvosok berendelési költségét, az ügyeleti pótlékokat, a szerződéses feltételeket, a műszakelrendezési korlátokat.

Ezeket a dimenziókat helyi szinten kell vizsgálni, és a kapacitási elemzés mellé kell helyezni. A gazdasági elemzés elvégzése a következő lépés, amely a jelen tanulmány keretein kívül esik.

> A KORLÁTOK ÖSSZEFOGLALÁSA
>
> A tanulmány korlátai nem érvénytelenítik a következtetéseket — meghatározzák az érvényességi körüket. A módszer erős: azonosítja a szűk keresztmetszetet, megmutatja a minimum kapacitásszükségletet, és kiszűri az elégtelen protokollokat. A helyi alkalmazáshoz azonban helyi adatok, napszaki kalibrálás és DES validálás szükséges.

TIZENÖTÖDIK FEJEZET

15 Javasolt következő lépések

Az elemzéstől a klinikai implementációig vezető útiterv

Ez a fejezet az olvasó számára egy cselekvési keretet ad: mit kellene tenni, milyen sorrendben, és milyen döntési pontok vannak az úton. Nem kötelező menetrend — hanem javaslat, amelyet a helyi feltételek mentén kell kalibrálni.

15.1 Az öt lépéses útiterv

1

Helyi adatok összegyűjtése

Szükséges: óránkénti betegérkezési ráta (legalább 3 hónap historikus adat, napszak szerinti bontásban), triázsszín-megoszlás, átlagos kezelési idők zónánként, jelenlegi orvosi kapacitás zónánként. Cél: a helyi Erlang-C modell paramétereinek meghatározása.

2

Egyszerű analitikus kalkulátor

A tanulmány Python pipeline-ja (Colab v1.2) közvetlenül alkalmazható helyi adatokkal. Ezt célszerű egy egyszerű Excel-verzióval is elkészíteni, amelyet a klinikai vezető is tud kezelni. Kimenet: ρ értékek zónánként, protokoll-aktiválási küszöb, minimális orvosszám surge-esetekre.

3 ***Diszkrét esemény szimuláció (DES)***

Az analitikus modell által legjobb protokollként azonosított P-D/P-D+ validálása Plant Simulation vagy AnyLogic modellel. A DES napszaki dinamikát, nem-exponenciális kezelési időket, ágyblokkokat és a kaszkád-összeomlás dinamikáját is modellezi. Ez az egyetlen módszer a pontos LOS előrejelzésre.

4 ***Gazdasági elemzés***

A P-D+ protokoll extra orvosi kapacitásának költsége versus betegbiztonsági haszon (csökkent mortalitás, rövidebb LOS, alacsonyabb readmisszió). A betegbiztonsági irodalom (Richardson, 2006; Bernstein et al., 2009) alapján a kezelési várakozás csökkentése mérhető mortalitáscsökkentéssel jár — ezt kell a költségek mellé helyezni.

5 ***Pilot bevezetés és validálás***

Egy tervezett surge-szituációban (pl. influenzaszezon csúcsa) a számított protokoll valódi bevezetése. Az aktuális ρ értékek mérése, LOS rögzítése, protokoll-aktiválási idő dokumentálása. Összehasonlítás a modell-előrejelzéssel — az eltérések a modell helyi kalibrálásának alapjai.

15.2 A legfontosabb rendszerszintű javaslat

A könyv zárásaképpen egy strukturális javaslatot fogalmazunk meg, amely túlmutat az egyes kórházak szintjén.

Az egészségügyi minőségbiztosítási és akkreditációs rendszerek jelenleg elsősorban a triázs-KPI-t és a napi betegszámot követik. A tanulmány megmutatja, hogy ezek szükséges, de nem elegendő mutatók. A teljes képhez szükséges lenne a kezelési zónák ρ-mutatójának rendszeres gyűjtése és reporting-ba illesztése.

Ez nem technikai akadály — a ρ közelítőleg becsülhető a várakozási listából és az aktív kapacitásból, valós időben, meglévő klinikai informatikai rendszerekből. Amit hiányzik, az a szabályozói igény és a reporting-

protokoll.

RENDSZERSZINTŰ JAVASLAT

Adjuk hozzá a kezelési sor ρ-mutatóját a sürgősségi osztályok standard teljesítménymutatóihoz. Ez nem igényel új mérőeszközöket — csak a meglévő várólistahossz és aktív kapacitás hányadosának rendszeres számítását és dashboardon való megjelenítését. Egy ilyen mutató bevezetése a jelenleg láthatatlan kezelési összeomlásokat láthatóvá tenné, és lehetővé tenné a megelőző protokoll-aktiválást.

Az I. rész zárása

Tizenöt fejezeten át egyetlen gondolatot jártunk körül — egyre több oldalról, egyre mélyebbre ásva. Az Erlang-C modell matematikájától a Monte Carlo farokrizikóig, a portugál kórház adataitól a helyi implementáció útitervéig. De a könyv legfontosabb mondata most is ugyanaz, mint az első oldalon:

„A sürgősségi osztály surge-kapacitását nem a triázspultok száma, hanem az orange és yellow kezelési zónák stabil orvosi kapacitása dönti el."

Ez nem kritika a triázs fontosságával szemben. A triázs gyors, pontos, életmentő — és a Manchester rendszer jól méretezett. A probléma az, hogy a triázs KPI-ra épülő döntési reflex — „torlódás van, gyorsítsuk a triázst" — félrevezető, ha a valódi szűk keresztmetszet a kezelési oldalon van. Márpedig a tanulmány alapján surge esetén ez általában így van.

A II. rész a teljes tudományos tanulmányt tartalmazza angol nyelven, az összes módszertani részlettel, képlettel, táblázattal és irodalommal. A függelékek összefoglalják az adatokat, a levezetéseket és az összes hivatkozást.

II. RÉSZ

Tudományos tanulmány

Surge Capacity Protocol Optimisation in Emergency Department Operations: An M/M/c Queuing Theory Analysis with Monte Carlo Robustness Assessment

Surge Capacity Protocol Optimisation in Emergency Department Operations: An M/M/c Queuing Theory Analysis with Monte Carlo Robustness Assessment

Melegh János Gábor

Budapest University of Technology and Economics · Ipar 4.0 Képzés, Folyamatszimulációs Modul · 2026

Data source: Gouveia et al. (2021), *Applied Sciences* 11(2), 805 · doi: 10.3390/app11020805 · CC BY 4.0

ABSTRACT

Background. Emergency department (ED) overcrowding during surge events — defined here as a doubling of the nominal patient arrival rate (λ = 8.4 patients h^{-1}) — represents a critical operational challenge for public healthcare systems. While discrete-event simulation (DES) is the gold standard for ED capacity planning, analytical queuing models provide rapid, mathematically rigorous preliminary estimates that can guide protocol design prior to full simulation.

Methods. We apply the M/M/*c* Erlang-C queuing model to a three-zone Manchester Triage System ED parameterised from a published Portuguese public hospital dataset (Gouveia et al., 2021). Six surge response protocols (P-A through P-D+) are evaluated against two performance criteria: (i) Manchester triage KPI compliance — $P(W_{triage} \leq 10 \text{ min}) \geq 0.95$ for orange-category patients — and (ii) treatment-queue stability ($\rho < 1.0$ for all treatment zones). Monte Carlo sensitivity analysis (n = 10,000) with ±20% uniform parameter variation quantifies protocol robustness under realistic uncertainty.

Results. The triage KPI is found to be robust across all scenarios ($P(\text{KPI} \geq 0.95) = 1.000$ for every protocol), indicating that the triage queue is not the primary capacity constraint. The treatment queue becomes unstable ($\rho > 1$) from Surge +50% onward under the baseline staffing configuration. Protocols P-A, P-B, and P-C all fail to restore treatment-queue stability at Surge +100%. Protocol P-D (4 triage stations; 8 orange-zone physicians; 4 yellow-zone physicians) is the minimum-resource configuration that simultaneously satisfies the triage KPI (100.0%) and stabilises both treatment queues ($\rho_{orange} = 0.788$; $\rho_{yellow} = 0.819$). The enhanced variant P-D+ (9 orange; 5 yellow physicians) reduces the 95th-percentile server utilisation to $\rho_{p95} = 0.902$ and 0.843, achieving P(both queues stable) = 1.000 across all Monte Carlo trials. A counterintuitive staffing-efficiency effect is observed: P-D yields a lower mean orange treatment waiting time (38.0 min) than the baseline system (176.2 min) despite twice the patient volume, attributable to the Erlang square-root staffing law.

Conclusions. The analytical framework identifies treatment capacity — not triage throughput — as the operative bottleneck under surge conditions. Protocol P-D constitutes the analytically minimum viable

surge response; P-D+ is recommended for operational resilience. Full DES validation and cost-effectiveness analysis are proposed as necessary next steps before clinical implementation.

Keywords: emergency department; surge capacity; queuing theory; Erlang-C model; Manchester triage system; Monte Carlo sensitivity analysis; capacity planning; server utilisation

1. INTRODUCTION

Emergency department overcrowding is a recognised global public health concern, associated with increased patient mortality, diminished care quality, and prolonged length of stay [1,2]. The problem is particularly acute during surge events — defined operationally as any episode in which the patient arrival rate substantially exceeds planned capacity — including influenza epidemics, mass-casualty incidents, and pandemic crises. The COVID-19 pandemic provided stark evidence that existing surge protocols are frequently inadequate [3].

The Manchester Triage System (MTS), in use across the United Kingdom, Portugal, the Netherlands, and several other European jurisdictions, classifies presenting patients into five priority categories with associated maximum waiting-time targets [4]. The orange category carries a target of initial medical contact within 10 minutes for at least 95% of patients, and represents the single most operationally sensitive performance indicator during surge, because its prevalence in the patient mix increases disproportionately with event severity [5].

Discrete-event simulation (DES) is widely considered the methodological gold standard for ED capacity planning [6,7]. However, DES model development is time-intensive. Prior to full DES development, analytical queuing models offer computationally tractable preliminary estimates that substantially reduce the parameter space and inform protocol design [8]. The M/M/c Erlang-C model has been applied to ED triage systems [9,10] and ICU staffing [11], but its systematic application to the comparative

evaluation of named surge response protocols — stratified by both triage and treatment queues — has not previously been reported for the Manchester triage context.

The present study addresses three research questions. **RQ1:** Under Surge +100%, which queuing component — triage or treatment — constitutes the operative capacity bottleneck? **RQ2:** What is the minimum staffing configuration that simultaneously satisfies the MTS orange KPI and stabilises all treatment queues? **RQ3:** What is the robustness of the identified optimal protocol under realistic parameter uncertainty?

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 DATA SOURCE AND ETHICAL CONSIDERATIONS

All parameters were sourced from Gouveia et al. (2021) [13], a peer-reviewed study of a Portuguese public hospital ED conducted under an approved institutional ethics framework. The present study re-analyses published aggregate-level data; no individual patient records were accessed.

2.2 SYSTEM DESCRIPTION AND PARAMETRISATION

The modelled ED comprises three sequential processing stages: (i) administrative admission (μ_{adm}^{-1} = 8.0 min, σ = 3.0 min), (ii) Manchester triage (μ_{tri}^{-1} = 5.0 min), and (iii) zone-specific treatment (green: 45 min; yellow: 90 min; orange: 150 min). Patient arrivals follow a Poisson process with baseline rate λ_0 = 4.2 patients h^{-1}.

Processing times were fitted to log-normal distributions and assessed via the Kolmogorov–Smirnov (KS) test on n = 1,000 synthetic samples. All five stages yielded KS p-values substantially exceeding the 0.05 threshold (Table A1 in Appendix A).

2.3 QUEUING MODEL

Each processing stage is modelled as an M/M/c queue. The steady-state delay probability (Erlang-C formula) is:

$$C(c, a) = (a^c/c!) \cdot (1 - \rho)^{-1} / [\sum_{k=0}^{c-1} a^k/k! + (a^c/c!) \cdot (1 - \rho)^{-1}] \quad (1)$$

where $a = \lambda/\mu$ is the offered load in Erlangs and $\rho = \lambda/(c\mu)$ is server utilisation. The mean queue waiting time is:

$$W_q = C(c, a) / [c\mu(1 - \rho)] \quad (2)$$

The KPI compliance probability — the fraction of patients whose triage waiting time does not exceed threshold t_{max} — is:

$$P(W_q \leq t_{max}) = 1 - C(c, a) \cdot \exp[-(c\mu - \lambda) \cdot t_{max}] \quad (3)$$

The triage KPI (Eq. 3) is computed with total arrival rate λ_{total} and c_{triage} servers. Treatment queues receive zone-specific sub-streams: $\lambda_{zone} = \lambda_{total} \times p_{zone}$.

2.4 SCENARIO DEFINITIONS

Eight scenarios are evaluated, spanning baseline conditions and six surge response protocols at Surge +100% (full parameter matrix in Appendix B, Table B1). The patient mix under surge reflects an empirically documented shift toward higher-acuity presentations: the orange fraction increases from 14% (baseline) to 30%.

2.5 MONTE CARLO SENSITIVITY ANALYSIS

Monte Carlo analysis was conducted for scenarios S0, S2+P-D, and S2+P-D+ with n = 10,000 iterations. In each iteration, four parameters were independently sampled from uniform distributions spanning ±20% of nominal values:

$$x_i \sim Uniform[(1 - 0.2)x_0, (1 + 0.2)x_0] \quad (4)$$

Primary robustness metrics reported: P(KPI ≥ 0.95), P($\rho_{orange} < 1$), P($\rho_{yellow} < 1$), and P(both queues stable). A two-sample independent *t*-test compared mean orange treatment waiting time between P-D and P-D+; effect size was quantified using Cohen's *d*.

3. RESULTS

3.1 BASELINE SYSTEM CHARACTERISATION (S0)

Under baseline conditions ($\lambda = 4.2\ h^{-1}$), the triage queue exhibits low utilisation ($\rho_{triage} = 0.175$), yielding KPI compliance P($W_{q,triage} \leq 10$ min) = 0.9981. The treatment queues, by contrast, exhibit substantially higher utilisation: $\rho_{orange} = 0.735$ and $\rho_{yellow} = 0.945$, producing $W_{q,orange}$ = 176.2 min and $W_{q,yellow}$ = 751.3 min respectively. It is critical to note that the Manchester KPI measures triage waiting time exclusively — KPI compliance of 99.81% coexists with orange treatment waiting of 176 minutes.

3.2 PROTOCOL COMPARISON: ERLANG-C RESULTS

Table 1 presents Erlang-C results for all eight scenarios. Three observations warrant attention.

First, the Manchester triage KPI is met across all scenarios. At Surge +100% without any protocol (S2), KPI = 98.65%; triage utilisation reaches only $\rho_{triage} = 0.350$ with two stations, well below the instability threshold. This directly answers RQ1: the triage queue is not the operative bottleneck.

Second, protocols P-A through P-C all fail to stabilise treatment queues. P-A (triage expansion only) leaves $\rho_{orange} = 3.150$ unchanged. P-B (bed and staffing expansion, $c_{orange} = 4$) reduces orange utilisation to $\rho_{orange} = 1.575$ — still far above unity. P-C, combining P-A and P-B, achieves identical treatment-side performance to P-B alone.

Third, protocol P-D (c_{orange} = 8, c_{yellow} = 4) is the minimum configuration achieving system-wide stability: ρ_{orange} = 0.788 and ρ_{yellow} = 0.819, both below unity, directly answering RQ2.

Scenario	KPI (%)	ρ_{triage}	ρ_{orange}	ρ_{yellow}	$W_{q,orange}$ (min)	$W_{q,yellow}$ (min)	S
S0 Baseline	99.81	0.175	0.735	0.945	176.2	751.3	
S1 Surge +50%	99.43	0.263	1.575	1.418	∞	∞	
S2 No protocol	98.65	0.350	3.150	1.638	∞	∞	
S2 + P-A	100.00	0.175	3.150	1.638	∞	∞	
S2 + P-B	98.65	0.350	1.575	1.092	∞	∞	
S2 + P-C	100.00	0.175	1.575	1.092	∞	∞	
S2 + P-D ★	100.00	0.175	0.788	0.819	38.0	78.4	Y
S2 + P-D+	100.00	0.175	0.700	0.655	13.6	16.2	

Table 1. *Erlang-C analytical results for all eight scenarios. KPI: $P(W_{q,triage} \leq 10$ min) for orange patients. ∞ denotes unstable queue ($\rho \geq 1$). P-D (★) is the minimum configuration achieving full system stability.*

3.3 MONTE CARLO ROBUSTNESS ANALYSIS

The triage KPI is perfectly robust: P(KPI ≥ 0.95) = 1.000 across all three scenarios and all 10,000 Monte Carlo trials. For P-D, the 95th-percentile orange utilisation marginally exceeds unity ($\rho_{P95,orange}$ = 1.015), indicating residual tail risk under simultaneous adverse parameter combinations. The joint stability probability is P(both stable) = 0.850. For P-D+, both 95th-

percentile utilisations remain below unity ($\rho_{P95,orange} = 0.902$; $\rho_{P95,yellow} = 0.843$), and P(both stable) = 1.000 across all Monte Carlo trials, directly answering RQ3.

Metric	S0 Baseline	S2 + P-D	S2 + P-D+
$P(KPI_{triage} \geq 0.95)$	**1.0000**	**1.0000**	**1.0000**
KPI P_{10}	0.9953	**1.0000**	**1.0000**
ρ_{orange} median	**0.726**	**0.778**	**0.691**
ρ_{orange} P_{95}	**0.947**	**1.015 (!)**	**0.902**
ρ_{yellow} median	**0.933**	**0.809**	**0.647**
ρ_{yellow} P_{95}	**1.216**	**1.054 (!)**	**0.843**
P(both queues stable)	**0.649**	**0.850**	**1.000**

Table 2. *Monte Carlo robustness results (n = 10,000; ±20% uniform parameter variation). P_{10}, P_{95}: empirical percentiles of the utilisation distribution.*

3.4 THE ERLANG SQUARE-ROOT STAFFING EFFECT

Protocol P-D, despite handling twice the patient volume of the baseline, yields a mean orange treatment waiting time of 38.0 min — 78.4% lower than the baseline (176.2 min). This is explained by the Erlang square-root staffing law (Halfin–Whitt, 1981) [16]: in the baseline configuration, the Erlang-C delay probability is C(2, 1.470) = 0.623, meaning 62.3% of patients must queue. Under P-D, C(8, 6.300) = 0.114, despite nearly identical utilisation ratios (ρ = 0.735 vs. 0.788). The eight-server configuration dramatically reduces the probability that all servers are simultaneously busy, yielding a disproportionately lower waiting time. Statistical comparison of P-D vs. P-D+ orange waiting times: $t(18) = 38.07$; $p < 0.001$; Cohen's d = 8.97 (very large).

4.1 TREATMENT CAPACITY AS THE OPERATIVE BOTTLENECK

The finding that Manchester triage KPI compliance and treatment-queue instability can coexist simultaneously has direct implications for surge protocol design. Triage acceleration protocols (P-A) may improve KPI figures while leaving the treatment bottleneck entirely unaddressed. This is consistent with Vanbrabant et al. (2019) [7], who identified treatment capacity as the dominant constraint in high-volume EDs, and with clinical evidence linking post-triage boarding — not pre-triage waiting — to adverse outcomes [15,19].

4.2 MINIMUM VIABLE SURGE PROTOCOL

Protocol P-D represents the minimum-resource configuration achieving joint stability at Surge +100%, requiring a 300% increase in orange physician capacity (2 → 8). This large proportional increase reflects the non-linear relationship between server utilisation and waiting time: in the high-utilisation regime ($\rho > 0.7$), small reductions in ρ produce disproportionately large reductions in W_q. The P-D+ variant adds only two additional physicians but raises P(both stable) from 85.0% to 100.0%, at a marginal additional resource cost.

4.3 LIMITATIONS

Distributional assumptions. The M/M/c model assumes exponential service times. Log-normal service times (Table A1) produce a correction factor of approximately 1.08 for the orange zone (CV ≈ 0.40), suggesting a modest underestimation of waiting time. This does not affect the qualitative conclusions. *Stationarity.* The model assumes a stationary arrival process; real EDs exhibit strong diurnal periodicity. *Single-site data.* External validity to EDs with different case mixes or service models is unknown. *Ab-*

sence of full DES validation. The present results are analytical predictions pending DES confirmation. *Cost analysis.* No cost-effectiveness analysis was performed.

5. CONCLUSIONS

This study applies M/M/*c* Erlang-C queuing theory to evaluate surge response protocols for a Manchester Triage System ED. The following conclusions are supported by the analytical evidence:

1. The Manchester triage KPI is maintained across all tested scenarios; the triage queue is not the operative capacity constraint.
2. Treatment-queue instability emerges from Surge +50% onward under baseline staffing; protocols P-A, P-B, and P-C are analytically insufficient.
3. Protocol P-D (4 triage; 8 orange; 4 yellow physicians) is the minimum configuration achieving simultaneous KPI compliance and treatment-queue stability at Surge +100%.
4. Protocol P-D+ (9 orange; 5 yellow physicians) eliminates residual tail risk, achieving P(both stable) = 1.000 under ±20% parameter uncertainty (10,000 Monte Carlo trials).
5. A counterintuitive efficiency gain is observed: P-D produces lower mean orange waiting time (38.0 min) than the baseline system (176.2 min) despite double the patient volume, attributable to the Erlang square-root staffing law.

Függelék A

Eloszlásillesztési eredmények és nyers adatok

A1. Feldolgozási idők log-normális illesztése

A feldolgozási időket log-normális eloszlással illesztettük, amelynek paraméterei a következő összefüggésekkel számíthatók az átlag (μ_{aritm}) és a szórás (σ_{aritm}) értékekből:

$$\sigma_{ln} = \sqrt{ln(1 + CV^2)} \; ; \; \mu_{ln} = ln(\mu_{aritm}) - \sigma_{ln}^2/2 \qquad (A1)$$

ahol CV = $\sigma_{aritm}/\mu_{aritm}$ a variációs koefficiens. A Kolmogorov–Smirnov teszt minden folyamatszakaszra n = 1000 szintetikus minta alapján elvégzett:

Folyamatszakasz	Átlag (perc)	Szórás (perc)	CV	Shape σ_{ln}	Scale $e^{\mu_{ln}}$	KS p-érték
Adminisztrációs felvétel	8,00	3,00	0,375	0,3627	7,491	**0,9197**
Triázs	5,00	2,00	0,400	0,3853	4,642	**0,0605**
Zöld kezelés	45,00	20,00	0,444	0,4246	41,12	**0,8900**
Sárga kezelés	90,00	35,00	0,389	0,3753	83,88	**0,3157**
Narancs kezelés	150,00	60,00	0,400	0,3853	139,27	**0,6527**

A1. táblázat / Table A1. *Log-normális eloszlásillesztési eredmények (n = 1000 szintetikus minta). Minden p-érték > 0,05, a H_0 (a minta log-normális eloszlást követ) elutasítása nem indokolt. KS: Kolmogorov–Smirnov.*

A2. Betegérkezési folyamat

A betegérkezések Poisson-folyamatot követnek (exponenciálisan eloszlott köz-időközökkel). Az alap érkezési ráta λ_0 = 4,2 beteg/óra = 0,07 beteg/perc. Az átlagos érkezési köz 14,29 perc.

A3. Betegmix összefoglalója

Triázskategória	Alap (%)	Surge +50% (%)	Surge +100% (%)	Max. várakozás	KPI cél
Zöld	55	49	42	120 perc	≥ 85%
Sárga	30	30	26	30 perc	≥ 90%
Narancs	**14**	**20**	**30**	**10 perc**	**≥ 95%**
Piros	1	1	2	0 perc	100%

A2. táblázat / Table A2. *Betegmix szcenáriónként. A narancs arány surge +100%-on megduplázódik (14% → 30%), ami a kezelési terhelés 4,3-szoros növekedését okozza.*

Függelék B

Konszolidált összehasonlítás — Mind a 8 szcenárió

B1. Teljes paraméter-mátrix

Szcenárió	λ/h	Nar. arány	c_{tri}	c_{orange}	c_{yellow}	ρ_{tri}	ρ_{orange}	ρ
S0 Alap	4,2	14%	2	2	2	0,175	0,735	0
S1 Surge+50%	6,3	20%	2	2	2	0,263	1,575	1
S2 Nincs protokoll	8,4	30%	2	2	2	0,350	3,150	1
S2+P-A	8,4	30%	4	2	2	0,175	3,150	1
S2+P-B	8,4	30%	2	4	3	0,350	1,575	1
S2+P-C	8,4	30%	4	4	3	0,175	1,575	1
S2+P-D ★	**8,4**	**30%**	**4**	**8**	**4**	**0,175**	**0,788**	**0**
S2+P-D+	**8,4**	**30%**	**4**	**9**	**5**	**0,175**	**0,700**	**0**

B1. táblázat / Table B1. *Teljes paraméter- és eredménymátrix mind a 8 szcenárióra. c: párhuzamos szerverek száma. ρ: kihasználtság. KPI: $P(W_{q,triage} \le 10\ perc)$, narancs betegek, százalékban.*

B2. Monte Carlo összefoglalás

Mutató	S0 Alap	S2+P-D	S2+P-D+
P(KPI ≥ 95%), n=10 000	1,0000	1,0000	1,0000
KPI P_{10}	0,9953	1,0000	1,0000
ρ_{orange} medián	0,726	0,778	0,691
ρ_{orange} P_{95}	0,947	1,015	0,902
ρ_{yellow} medián	0,933	0,809	0,647
ρ_{yellow} P_{95}	1,216	1,054	0,843
P(mindkét sor stabil)	0,649	0,850	1,000
$W_{q,orange}$ – Erlang-C (perc)	176,2	38,0	13,6
$W_{q,yellow}$ – Erlang-C (perc)	751,3	78,4	16,2

B2. táblázat / Table B2. *Monte Carlo összefoglaló (n = 10 000, ±20% egyenletes variáció). P_{95}: a kihasználtság-eloszlás 95. percentilise. W_q: Erlang-C névleges értékek.*

Függelék C

Képletek, levezetések és a Pollaczek–Khinchine korrekció

C1. Az Erlang-C modell összefoglalója

Az M/M/c sorbanállási rendszer Erlang-C delay valószínűsége ($a = \lambda/\mu$ Erlang terhelés, $\rho = a/c$):

$$C(c, a) = (a^c/c!) \cdot (1-\rho)^{-1} / [\Sigma_{k=0}^{c-1} a^k/k! + (a^c/c!) \cdot (1-\rho)^{-1}] \quad \text{(C1)}$$

Átlagos várakozási idő a sorban:

$$W_q = C(c, a) / [c\mu(1-\rho)] \quad \text{(C2)}$$

KPI-megfelelési valószínűség (t_{max} = 10 perc az orange KPI esetén):

$$P(W_q \le t_{max}) = 1 - C(c, a) \cdot e^{-(c\mu-\lambda)\cdot t_{max}} \quad \text{(C3)}$$

C2. A Pollaczek–Khinchine korrekció

Az M/G/1 sorbanállási rendszerben (általános szervizidő-eloszlás, egy szerver) a Pollaczek–Khinchine képlet:

$$W_q^{(G)} = \rho \cdot E[S] \cdot (1 + CV^2) / [2(1-\rho)] \quad \text{(C4)}$$

ahol CV = σ/E[S] a kezelési idő variációs koefficiense, E[S] az átlagos kezelési idő. Az M/M/1 esethez képest a korrekciós faktor $(1 + CV^2)/2$. Az orange kezelési idő esetén (átlag 150 perc, szórás 60 perc): CV = 60/150 = 0,40; korrekciós faktor = (1 + 0,16)/2 = 0,58 — ami az M/M/c becslésnél ~8%-kal magasabb valós várakozást jelent. Ez a torzítás mérsékelt és a protokoll-összehasonlítás eredményeit nem befolyásolja.

C3. Az Erlang négyzetgyök-staffing törvény

A Halfin–Whitt (1981) eredmény szerint: ha a rendszer forgalma *n*-szorosára nő, és a szerver-számot az ajánlott terhelés négyzetgyökénél valamivel többel bővítik, a rendszer a „quality and efficiency driven" (QED) rezsimbe lép, ahol a fajlagos várakozási idő és a szerver-kihasználtság egyaránt kedvező értéket vesz fel. Formálisan, ha $c = a + \beta\sqrt{a}$ (a Erlang terhelés, $\beta > 0$ biztonsági ráhagyás), akkor:

$$C(c, a) \to \alpha \in (0,1) \quad \text{és} \quad W_q \to O(1/\sqrt{a}) \text{ ahogy } a \to \infty \tag{C5}$$

Ez magyarázza a P-D paradoxont: a P-D konfiguráció (a = 6,300, c = 8, $\beta \approx$ 0,67) a QED rezsim közelében van, ezért $C(c,a)$ = 0,114 — jóval alacsonyabb, mint az alap rendszer értéke 0,623 —, annak ellenére, hogy a kihasználtság (ρ = 0,788) magasabb az alap rendszerénél (ρ = 0,735).

FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM — REFERENCES

[1] Pitts, S.R. et al. National Hospital Ambulatory Medical Care Survey: 2006 Emergency Department Summary. *Natl. Health Stat. Rep.* 2008, *7*, 1–38.

[2] Bernstein, S.L. et al. The effect of emergency department crowding on clinically oriented outcomes. *Acad. Emerg. Med.* 2009, *16*, 1–10. doi:10.1111/j.1553-2712.2008.00295.x

[3] Ranney, M.L.; Griffeth, V.; Jha, A.K. Critical supply shortages — the need for ventilators and personal protective equipment during the COVID-19 pandemic. *N. Engl. J. Med.* 2020, *382*, e41. doi:10.1056/NEJMp2006141

[4] Mackway-Jones, K.; Marsden, J.; Windle, J. (Eds.) *Emergency Triage: Manchester Triage Group*, 3rd ed.; BMJ Publishing: London, 2014.

[5] Christ, M. et al. Modern triage in the emergency department. *Dtsch. Arztebl. Int.* 2010, *107*, 892–898. doi:10.3238/arztebl.2010.0892

[6] Duguay, C.; Chetouane, F. Modeling and improving emergency department systems using discrete event simulation. *Simulation* 2007, *83*, 311–320. doi:10.1177/0037549707083111

[7] Vanbrabant, L. et al. Simulation of emergency department operations: A comprehensive review of KPIs and operational improvements. *Simul. Model. Pract. Theory* 2019, *98*, 101977. doi:10.1016/j.simpat.2019.101977

[8] Worthington, D. Reflections on queue modelling from the last 50 years. *J. Oper. Res. Soc.* 2009, *60*(S1), S83–S92. doi:10.1057/jors.2008.166

[9] Green, L.V. et al. Using queueing theory to increase the effectiveness of emergency department provider staffing. *Acad. Emerg. Med.* 2006, *13*, 61–68. doi:10.1197/j.aem.2005.07.034

[10] Huang, X.M. Patient attitude towards waiting in an outpatient clinic and its applications. *Health Serv. Manage. Res.* 1994, *7*, 2–8.

[11] Bekker, R.; Koeleman, P.M. Scheduling admissions and reducing variability in bed demand. *Health Care Manag. Sci.* 2011, *14*, 237–249. doi:10.1007/s10729-011-9163-x

[12] Litvak, E.; Bisognano, M. More patients, less payment: Increasing hospital efficiency in the aftermath of health reform. *Health Aff.* 2011, *30*, 76–80. doi:10.1377/hlthaff.2010.1114

[13] Gouveia, C.; Kalakou, S.; Cardoso-Grilo, T. Modeling, Assessment and Design of an Emergency Department of a Public Hospital through Discrete-Event Simulation. *Appl. Sci.* 2021, *11*, 805. doi:10.3390/app11020805

[14] Komashie, A.; Mousavi, A. Modeling emergency departments using discrete event simulation techniques. In *Proceedings WSC 2005*; IEEE: Piscataway, NJ, 2005; pp. 2681–2685.

[15] Hoot, N.R.; Aronsky, D. Systematic review of emergency department crowding: Causes, effects, and solutions. *Ann. Emerg. Med.* 2008, *52*, 126–136. doi:10.1016/j.annemergmed.2008.03.014

[16] Halfin, S.; Whitt, W. Heavy-traffic limits for queues with many exponential servers. *Oper. Res.* 1981, *29*, 567–588. doi:10.1287/opre.29.3.567

[17] Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed.; Lawrence Erlbaum: Hillsdale, NJ, 1988.

[18] Forero, R.; McCarthy, S.; Hillman, K. Access block and emergency department overcrowding. *Crit. Care* 2011, *15*, 216. doi:10.1186/cc10435

[19] Richardson, D.B. Increase in patient mortality at 10 days associated with emergency department overcrowding. *Med. J. Aust.* 2006, *184*, 213–216.

[20] Mandelbaum, A.; Stolyar, A. Scheduling flexible servers with convex delay costs. *Oper. Res.* 2004, *52*, 836–855. doi:10.1287/opre.1040.0152

[21] Bangsow, S. *Tecnomatix Plant Simulation Modeling and Programming by Means of Examples*. Springer: Berlin, 2020.

Reprodukálhatóság: az összes számítás elvégezhető a mellékelt Google Colab pipeline segítségével (v1.2). Adatforrás: Gouveia et al. (2021), CC BY 4.0. Monte Carlo: numpy.random.default_rng(seed=42), n=10 000. Zenodo repository: doi meghatározás alatt.

NEM A TRIÁZS A SZŰK KERESZTMETSZET · MELEGH JÁNOS GÁBOR · 2026

„A sürgősségi osztály surge-kapacitását nem a triázspultok száma, hanem az orange és yellow kezelési zónák stabil orvosi kapacitása dönti el. A Manchester triázs KPI teljesítése szükséges, de nem elegendő feltétele a rendszer egészséges működésének."

Főeredmény 1

A triázs KPI surge +100% esetén is teljesül **minden vizsgált protokollban** — a triázs-sor nem a szűk keresztmetszet.

Főeredmény 2

A kezelési sorok **már surge +50%-tól instabillá válnak**. A P-A, P-B, P-C protokollok ezt nem orvosolják.

Főeredmény 3

P-D protokoll (4 triázs, 8 narancs, 4 sárga orvos): az első teljesen stabil surge konfiguráció surge +100%-on.

Főeredmény 4

P-D+ protokoll: P(mindkét sor stabil) = 100% ±20% paramétervariáció mellett — az ajánlott operatív standard.

Adatforrás: Gouveia et al., Appl. Sci. 2021, 11(2), 805
Módszertan: M/M/c Erlang-C · Monte Carlo n=10 000
Licenc: CC BY 4.0 · 2026

Nem a triázs a szűk keresztmetszet